



Е.И. Бойкова  
Л.Е. Исакова  
О.Н. Макарычева  
В.П. Гришкова

# ОПТИКА

Екатеринбург  
2010

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОУ ВПО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Кафедра физики

Е.И. Бойкова  
Л.Е. Исакова  
О.Н. Макарычева  
В.П. Гришкова

# ОПТИКА

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ  
по физике  
для студентов всех факультетов по всем направлениям

Екатеринбург  
2010

Печатается по рекомендации методической комиссии ЛМФ.  
Протокол № 1 от 30 сентября 2009 г.

Рецензент – доц. А.Н. Петров

Редактор К.В. Корнева  
Компьютерная верстка Г.И. Романовой

---

Подписано в печать 30.09.10

Плоская печать

Заказ №

Формат 60x84 1/16

Печ. л. 1,86

Поз. 29

Тираж 300 экз.

Цена 10 руб. 16 коп.

---

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ  
Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ

# Лабораторная работа 1

## Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона

Английский ученый Максвелл в 1865 г. теоретически доказал, что свет представляет собой электромагнитные волны. Электромагнитные волны, применяемые в радиотехнике, имеют длину волны от нескольких километров до нескольких сантиметров. Электромагнитные волны, представляющие собой свет, характеризуются длиной волны в несколько десятых микрона ( $1 \text{ микрон} = 10^{-6} \text{ метра}$ ).

Электромагнитная волна представляет собой распространение электромагнитного поля, причем вектора напряженности электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей перпендикулярны друг к другу и к линии распространения волн. Электромагнитные волны поперечны (рис. 1).

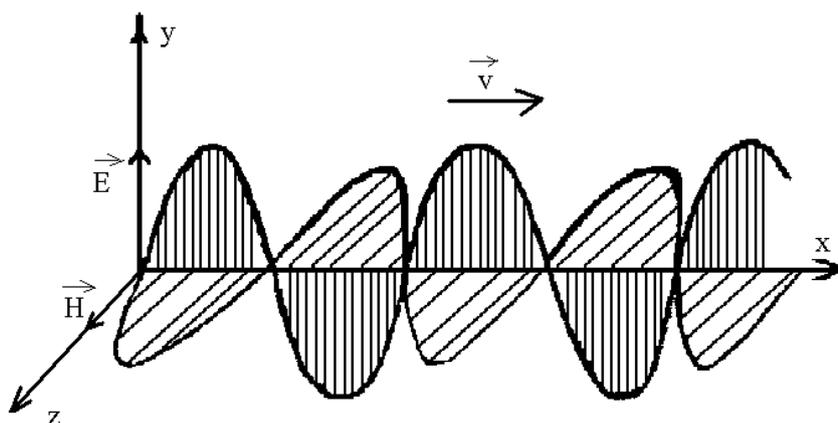


Рис. 1

Длина волны  $\lambda$  зависит от скорости распространения света  $v$  и частоты колебаний  $\nu$ :  $\lambda = v / \nu$ .

К числу явлений, подтверждающих волновую природу света, относится интерференция света.

Интерференцией называется явление усиления или ослабления колебаний при взаимном наложении волн монохроматического света. Интерференцию света можно наблюдать тогда, когда колебания совершаются в одинаковых фазах или сохраняют постоянную разность фаз, т.е. имеют одинаковую частоту, одно направление и сравнимые амплитуды.

Такие колебания называются когерентными. Получить систему когерентных волн можно, если пучок света, исходящий от источника, каким-либо способом разделить на два пучка, и затем эти пучки свести вместе.

При этом световые лучи этих пучков проходят различные пути, т.е. создается разность хода этих лучей, они будут интерферировать (усиливать или ослаблять друг друга).

Если разность хода двух лучей (обозначаемая значком  $\Delta$ ) равна четному числу полуволен, колебания совершаются в одинаковых фазах и лучи, накладываясь, усиливают друг друга. В данном случае имеем условие максимума:

$$\Delta = 2k \frac{\lambda}{2}, \quad k = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

Если же разность хода двух лучей равна нечетному числу полуволен (колебания совершаются в противоположных фазах), то они гасят друг друга, т.е. имеем условие минимума:

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad k = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

Для получения когерентных лучей и наблюдения явления интерференции, а также для определения радиуса кривизны линзы с помощью этого явления в данной работе берется следующая установка.

Пусть выпуклая поверхность линзы  $L$  с большим радиусом кривизны  $R$  соприкасается в некоторой точке  $O$  с плоской поверхностью стеклянной пластинки  $E$  так, что оставшаяся между ними воздушная прослойка постепенно утолщается от точки соприкосновения к краям (рис. 2).

Если на такую систему вертикально сверху падает монохроматический свет, то световые волны, отраженные от нижней (точка  $C$ ) и верхней (точка  $B$ ) границ воздушного промежутка между линзой и пластинкой, будут интерферировать между собой. При этом образуются интерференционные линии, имеющие форму концентрических светлых и темных колец убывающей ширины, называемые кольцами Ньютона.

Луч  $1$  в точке  $B_1$  на границе стекло-воздух частично отражается и частично преломляется по направлению  $B_1C$ . Затем, отразившись от поверхности пластинки в точке  $C$  и преломившись в линзе, выходят по направлению  $S$ . Таким образом, по направлению  $S$  идут когерентные световые волны.

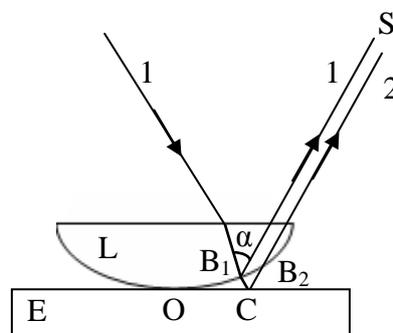


Рис. 2

Луч 2 отстает от луча 1, так как он проходит путь  $CB_1 + CB_2$  (в воздухе  $n = 1$ ).

Кроме того, необходимо учесть, что световые волны, как всякие волны, отражаясь от оптически более плотной среды, меняют фазу на противоположную, что эквивалентно изменению оптического пути на  $\lambda/2$ .

В нашем случае луч 2 отражается в точке С от более плотной среды, луч 1 в точке  $B_1$  от оптически менее плотной. Следовательно, между ними создается дополнительная разность хода в полволны. Учитывая это обстоятельство, мы получим, что разность хода лучей 1 и 2 равна:

$$\Delta = (B_1C + CB_2) + \frac{\lambda}{2}.$$

Так как между линзой и пластинкой Е находится воздух ( $n = 1$ ) и свет падает нормально ( $\alpha = 0$ ) к пластинке и практически к нижней поверхности линзы (кривизна линзы мала), то

$$\begin{aligned} B_1C &\approx CB_2 = d, \\ B_1C + CB_2 &= 2d, \end{aligned}$$

и разность хода в этом случае будет равна:

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2}. \quad (3)$$

На основании условий максимума (1), минимума (2) и равенства (3) можно записать, что если разность хода

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} = 2 \frac{k\lambda}{2} \quad (4)$$

то наблюдаются светлые кольца.

$$\text{Если } \Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (5)$$

то наблюдаются темные кольца, где  $d$  – толщина воздушного слоя на расстоянии  $r = OC$  от центра линзы до точки С (см. рис. 2).

Из равенства (4) и (5) следует, что толщина воздушного слоя  $d$  для темного кольца:

$$d = 2k + \frac{\lambda}{4}; \quad (6)$$

для светлого кольца:

$$d = (2k - 1) \frac{\lambda}{4}. \quad (7)$$

При наблюдении в отраженном свете в центре интерференционной картины наблюдается темное пятно (рис. 3), так как в месте соприкосновения линзы с пластинкой остается очень тонкая воздушная прослойка (толщиной, значительно меньшей  $\lambda$ ), и разность хода между лучами, возникающая в той точке, определяется потерей полволны  $\lambda/2$  при отражении от пластинки.



Рис. 3

Учитывая, что высота в треугольнике есть среднее пропорциональное между проекциями катетов на гипотенузу, из рис. 4 заключаем, что радиус кривизны линзы  $R$ , толщина воздушного слоя  $d$  и радиус интерференционного кольца  $r$ , соответствующего данной толщине, связаны соотношением:

$$r = \sqrt{(2R - d)d} = \sqrt{2Rd - d^2} .$$

Значением  $d^2$  в этом выражении можно пренебречь, тогда  $r \approx \sqrt{2Rd}$  или  $R = r^2 / 2d$ .

Подставляя значения  $d$  для темного кольца из равенства (6), получим  $R = r^2 / k\lambda$ .

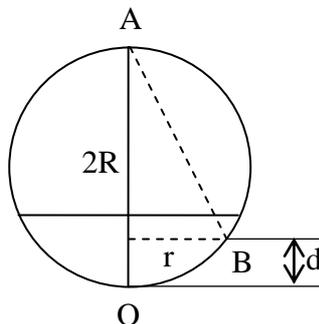


Рис. 4

Однако более точный результат получается, если  $R$  вычислить по радиусам двух темных (или двух светлых) колец по формуле:

$$R = (r_m^2 - r_n^2) \frac{a^2}{(m - n)\lambda} = \frac{(r_m - r_n)(r_m + r_n)a^2}{(m - n)\lambda}, \quad (8)$$

где  $m$  и  $n$  – порядковые номера колец,

$r_m$  и  $r_n$  – радиусы  $m$ -го и  $n$ -го колец, взятые в делениях измерительной шкалы,

$a$  – цена деления микроскопа.

Интерференционную картину (кольца Ньютона) мы наблюдаем с помощью микроскопа в отраженном свете.

## Ход работы

1. На столик микроскопа помещается плоскопараллельная стеклянная пластинка, на которую кладется выпуклой стороной плосковыпуклая линза. Пластинка и линза должны быть очень чистыми.

2. Лампочка осветителя включается с помощью тумблера трансформатора.

3. Очень медленно перемещая тубус микроскопа, фокусируют микроскоп на достаточно хорошее видение колец Ньютона. Сначала следует сфокусировать поверхность линзы, а затем перемещать линзу в поле зрения микроскопа.

4. Определить с помощью микрошкалы радиусы пяти темных колец Ньютона, не считая темного пятна в центре.

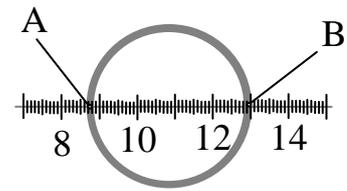


Рис. 5

Для этого измерить по окулярной шкале (рис. 5) координаты  $X_A$  и  $X_B$  точек А и В, лежащих на середине одной и той же интерференционной кольцевой полосы (слева и справа от центра кольца).

На рис. 5  $X_A = 87$  дел.,  $X_B = 129$  дел.

Заполнить таблицу 1.

Таблица 1

n	$X_A$ , дел.	$X_B$ , дел.	$r_k = \frac{ X_A - X_B }{2}$ , дел
1			$r_1 =$
2			$r_2 =$
3			$r_3 =$
4			$r_4 =$
5			$r_5 =$

5. По формуле (8) рассчитать радиус кривизны линзы  $R$ .

Определить среднее значение радиуса кривизны линзы

$$R_{cp} = (R_1 + R_2 + R_3) / 3.$$

Определить среднюю абсолютную  $\Delta R_{cp} = (\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3) / 3$  и относительную  $\Delta R_{cp} / R$  ошибки результатов измерения.

Результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2

n	Радиусы колец для расчета R	R, м	$\Delta R =  R_{cp} - R $ , м
1	$r_1, r_3$	$R_1 =$	$\Delta R_1 =$
2	$r_2, r_4$	$R_2 =$	$\Delta R_2 =$
3	$r_3, r_5$	$R_3 =$	$\Delta R_3 =$
		$R_{cp} =$	$\Delta R_{cp} =$

Записать относительную ошибку измерений  $\Delta R_{\text{ср}} / R$ .

Записать результат измерения радиуса кривизны линзы  $R = R_{\text{ср}} \pm \Delta R_{\text{ср}}$ .

*Примечание.* Цену деления микрошкалы и длину волны света  $\lambda$  узнать у преподавателя (лаборанта).

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте условия максимумов и минимумов света при интерференции когерентных лучей.
2. Что будет наблюдаться в центре интерференционной картины, если наблюдение проводить в проходящем свете?
3. Почему интерференционная картина исчезает при увеличении расстояния между линзой и пластинкой?

## Лабораторная работа 2

### Определение длины волны с помощью дифракционной решетки

В конце XIX века было установлено, что видимый свет является частным случаем электромагнитных волн. Различные виды этих волн отличаются друг от друга только длиной волны. Длина электромагнитных волн, излучаемых атомами светящегося тела и действующих на наш глаз, находится в пределах 0,4–0,8 микрона (1 микрон –  $10^{-6}$  метра).

Явлениями, подтверждающими волновую природу света, являются интерференция, дифракция и поляризация.

Интерференция волн заключается в том, что при взаимном наложении волн может произойти усиление и ослабление колебаний. Для образования интерференционной картины необходимо, чтобы две системы волн были согласованными, т.е. при одинаковой длине волны они выходили бы из центров колебаний в одинаковых фазах, или, если они при возникновении были сдвинуты по фазе, то сдвиг фаз со временем не должен меняться. Такие волны называются когерентными.

Для того, чтобы узнать, в каких фазах встретятся в данной точке S интерферирующие волны, нужно учесть разность хода этих волн.

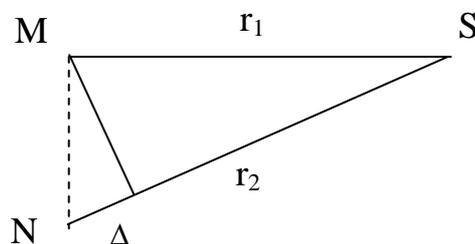


Рис. 1

Обозначим  $r_1$  – расстояние от первого источника M,  $r_2$  – расстояние от второго источника N до точки S (рис. 1).

Величина  $\Delta = r_1 - r_2$  называется разностью хода волн. Если источники колеблются в одинаковых фазах, то при разности хода, равной четному числу полувольт, в точку S волны будут приходить в одинаковых фазах, и при сложении возникнет усиление колебания. Если же разность хода равна нечетному числу полувольт, то в этой точке волны сойдутся в противоположных фазах, и в ней произойдет ослабление колебаний. Таким образом, два световых пучка, складываясь, могут или усиливать, или гасить друг друга.

Явление дифракции состоит в отклонении лучей от прямолинейного направления вблизи непрозрачных препятствий.

Дифракционной решеткой называется стеклянная пластинка, на которой с помощью делительной машины нанесены царапины. Царапины рассеивают свет и, следовательно, являются непрозрачной частью пластины. Сумма длин непрозрачного  $a$  и прозрачного  $b$  промежутков называется периодом или постоянной дифракционной решетки  $d$ .

$$d = a + b$$

Пусть на дифракционную решетку падает плоская световая волна так, что её лучи перпендикулярны плоскости решетки (рис. 2).

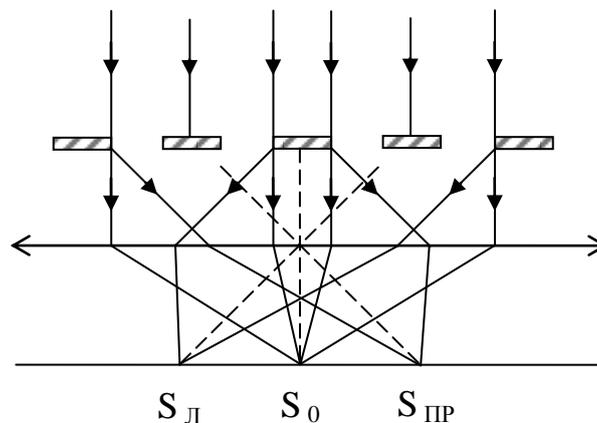


Рис. 2

В результате дифракции лучи за щелями будут распространяться в различных направлениях. Если на пути дифрагированных лучей поставить собирающую линзу, то в фокальной плоскости ее получится ряд светлых полос – максимумов  $S$ , разделенных темными промежутками.

Выясним, какому условию должны удовлетворять направления лучей, дающих при интерференции светлую полосу. На основании утверждения, носящего принципа таутохронизма, параллельные лучи, сведенные линзой в точке  $S$ , имеют разность фаз, какую они имели до линзы в любой плоскости, перпендикулярной к этим лучам.

Таким образом, лучи, перпендикулярные плоскости решетки, содержащей фронт волны (для них  $\varphi = 0$ ), сводятся в точке  $S_0$  в одинаковых фазах и дают максимум освещенности нулевого номера (порядка). Проведем от щели плоскость  $AC$ , перпендикулярную к лучам, рассеянным дифракционной решеткой, эта плоскость  $AC$  наклонена к решетке под углом  $\varphi$  (рис. 3).

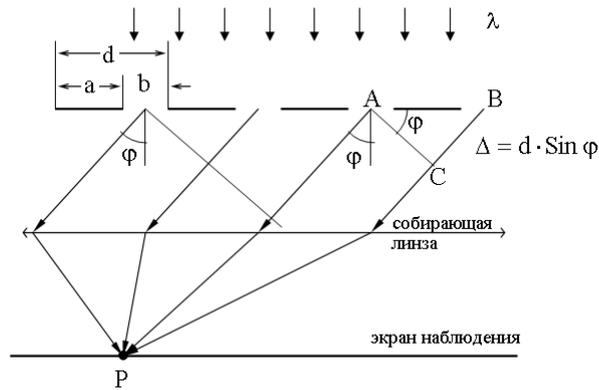


Рис. 3

Если соответствующие лучи, выходящие из точек решетки, находящиеся друг от друга на расстоянии ее периода  $(a + b)$  имеют до AC разность хода  $BC = 2k \frac{\lambda}{2}$ , то на AC они имеют одинаковые фазы и, будучи связаны в полосу S, по принципу таутохронизма усилят друг друга. Итак, условия

$$BC = 2k \frac{\lambda}{2} \quad \text{или} \quad (a + b) \sin \varphi = k \lambda$$

определяют светлую полосу – максимум n порядка.

Откуда можно записать

$$\lambda = \frac{(a + b) \sin \varphi}{k} = d \sin \varphi / kn, \quad (1)$$

где  $(a + b) = d$  – постоянная решетки.

## Описание прибора

Спектроскоп состоит из круглого столика T с градусными делениями, на котором размещены дифракционная решетка ДР, осветительная (коллиматорная труба К) и зрительная труба ЗР (рис. 4).

Коллиматор, имеющий щель, обращенную к источнику света I, неподвижен, зрительная труба вращается вокруг дифракционной решетки.

Положение трубы ЗР фиксируется по диску столика и круговому нониусу с точностью до минуты.

Пучок света от источника падает через щель в коллиматор и, так как щель находится в фокусе двояковыпуклой линзы  $O_1$ , выходит из трубы параллельным пучком на дифракционную решетку. Дифрагированные лучи собираются линзой  $O_3$  зрительной трубы в полосы, а другая линза  $O_4$ , ближняя к глазу, является лупой, через которую и рассматривается дифракционная картина.

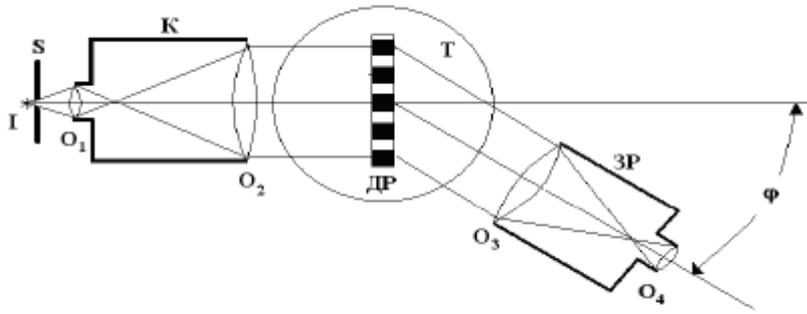


Рис. 4

### Ход работы

1. Освещают щель коллиматора монохроматическим светом и наводят зрительную трубу на дифракционную решетку. Убеждаются в исправности прибора; при небольшом смещении трубы влево и вправо – должны быть отчетливо видны несколько светлых полос (хотя бы до 3-4 порядка).

2. Поворотом зрительной трубы наводят нить окуляра поочередно на максимумы первого порядка, расположенные справа и слева от максимума нулевого порядка. Заносят в таблицу, измеренные с точностью до минуты, значения углов, соответствующие левому максимуму  $S_{1Л}$  и правому максимуму  $S_{1ПР}$ .

Таким же образом определяют соответствующие углы для левых и правых максимумов второго ( $S_{2Л}$ ,  $S_{2ПР}$ ) и третьего ( $S_{3Л}$ ,  $S_{3ПР}$ ) порядков.

3. Подсчитывают абсолютные значения углов поворота трубы от нормального к решетке положения по формуле

$$\varphi_k = |S_{кПР} - S_{кЛ}| / 2, \text{ где } k = 1, 2, 3.$$

4. Подсчитывают по формуле (1) длину волны источника света для максимума каждого порядка и заносят все результаты работы в таблицу.

### Таблица наблюдений и расчет

k = 1	k = 2	k = 3
$S_{1Л} =$	$S_{2Л} =$	$S_{3Л} =$
$S_{1ПР} =$	$S_{2ПР} =$	$S_{3ПР} =$
$\varphi_1 =$	$\varphi_2 =$	$\varphi_3 =$
$\sin \varphi_1 =$	$\sin \varphi_2 =$	$\sin \varphi_3 =$
$\lambda_1 =$	$\lambda_2 =$	$\lambda_3 =$
$\Delta\lambda_1 =$	$\Delta\lambda_2 =$	$\Delta\lambda_3 =$

Расчет делают по формулам:

$$\lambda_{\text{cp}} = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) / 3; \quad \Delta\lambda_k = |\lambda_{\text{кcp}} - \lambda_k|; \quad \Delta\lambda_{\text{cp}} = (\Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2 + \Delta\lambda_3) / 3,$$

где  $k = 1, 2, 3$ .

Вычисляют относительную ошибку измерения длины волны  $\epsilon_\lambda = \pm \Delta\lambda_{\text{cp}} / \lambda_{\text{cp}} \cdot 100\%$  и величину длины волны  $\lambda = \lambda_{\text{cp}} \pm \Delta\lambda_{\text{cp}}$ .

### Контрольные вопросы

1. Какие волны называются когерентными?
2. Что называется дифракцией и интерференцией света?
3. В каком направлении за дифракционной решеткой наблюдается максимум?

## Лабораторная работа 3

### Измерение показателя преломления стеклянной пластинки с помощью микроскопа

#### *Конструкция оптического микроскопа*

Несмотря на разнообразие моделей, большинство оптических микроскопов состоят из похожих типовых деталей.

- Окуляр. Та часть оптической системы, которая непосредственно связана с глазами наблюдателя. В простейшем случае окуляр состоит из одной линзы.

- Тубус. Деталь, обеспечивающая нужное взаиморасположение оптики окуляра и объектива.

- Объектив. Едва ли не самая важная часть микроскопа, обеспечивающая основное увеличение.

- Крепление, удерживающее все детали конструкции в нужном положении.

- Предметный столик, на котором размещают исследуемые образцы. Это либо тонкие срезы на предметных стеклах для микроскопов, работающих в «проходящем свете», либо объемные объекты для микроскопов «отраженного света».

- Крепления, которыми предметные стекла фиксируются на предметном столике.

- Диафрагма. В основном в микроскопах применяют так называемые «ирисовые» диафрагмы, названные так потому, что содержат лепестки, подобные лепесткам цветка ириса. Сдвигая или раздвигая лепестки, можно плавно регулировать силу светового потока, поступающего на исследуемый образец.

- Винт грубой настройки фокусировки позволяет, изменяя расстояние от объектива до исследуемого образца, добиваться наиболее четкого изображения.

- Винт точной фокусировки. То же самое, только с меньшим шагом и меньшим «ходом» резьбы для максимально точной регулировки.

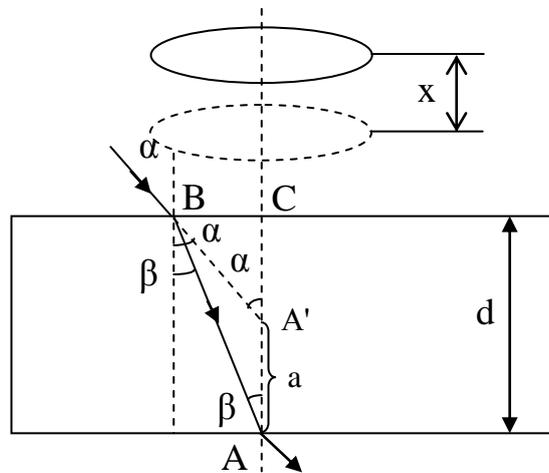
- Осветитель. Очень часто используется обыкновенное зеркало, позволяющее направлять на исследуемый образец дневной свет. В настоящее время часто применяют специальные галогенные лампы, имеющие спектр, близкий к естественному белому свету и не вызывающие грубых искажений цвета.

- Основание. Обычно выполняется достаточно массивным, из металлического литья, для обеспечения устойчивости микроскопа во время работы.

При наблюдении предмета сквозь слой воды или стеклянную пластинку объект всегда кажется расположенным ближе к наблюдателю, чем

в действительности. Это кажущееся приближение связано с преломлением света на границе пластинки с воздухом и зависит как от толщины, так и от ее показателя преломления. Измеряя толщину пластинки с помощью микрометра, а кажущееся смещение предмета при наблюдении сквозь пластинку с помощью микроскопа, тубус которого снабжен микрометрическим винтом, можно определить показатель преломления пластинки.

Пусть на столике микроскопа лежит плоскопараллельная стеклянная пластинка толщины  $d$ , микроскоп сфокусирован на метки или пылинки, находящиеся на ее верхней стороне. Для того, чтобы увидеть в микроскоп пылинки, находящиеся на нижней стороне пластинки, его тубус необходимо переместить на некоторое расстояние  $x$  (рисунок). Вследствие преломления лучей  $x < d$ .



Существует связь между толщиной исследуемой стеклянной пластинки, высотой кажущегося подъема предмета (подъема тубуса микроскопа) и показателем преломления стекла. Для установки этой связи рассмотрим ход лучей от точки  $A$  (см. рисунок) через стеклянную пластинку. При этом будем предполагать, что глаз находится на той нормали к плоскостям пластинки, которая проходит через точку  $A$ , и луч  $AB$  составляет с нормалью малый угол  $\beta$ .

На границе двух сред луч  $AB$  претерпевает преломление и на выходе из пластинки в воздух составляет с нормалью к поверхности угол, равный  $\alpha$ , который связан с углом  $\beta$  через показатель преломления  $n$ , т.е.

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

Наблюдателю кажется, что рассматриваемый луч исходит не из точки  $A$ , а из точки  $A'$ , приподнятой на высоту  $a$ , равную  $AA'$ .

Рассматривая треугольники  $ABC$  и  $A'BC$ , можно написать, что

$$BC = d \cdot \operatorname{tg} \beta;$$

$$BC = (d - a) \operatorname{tg} \alpha \text{ или } d \cdot \operatorname{tg} \beta = (d - a) \operatorname{tg} \alpha, \text{ откуда}$$

$$\frac{d}{d - a} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} = n; \quad x = d - a; \quad n = \frac{d}{d - a} = \frac{d}{x}. \quad (2)$$

Измеряя толщину пластинки  $d$  и перемещение тубуса микроскопа при перефокусировке его с верхней стороны пластинки на нижнюю, можно по формуле (2) определить показатель преломления  $n$ .

## Ход работы

Назовем винт грубой настройки фокусировки винтом А, а винт точной настройки фокусировки винтом В.

На обеих поверхностях стеклянной пластинки нанесены царапины.

1. Измеряют микрометром несколько раз толщину  $d$  пластинки и находят среднее значение.

2. Помещают пластинку на предметный столик так, чтобы пересечение царапин оказалось в центре поля зрения микроскопа. Тубус микроскопа должен быть поднят винтом А над предметным столиком так, чтобы расстояние между объективом и пластинкой было не меньше одного-двух сантиметров.

3. Микрометрическим винтом В опускают тубус в нижнее положение, а затем винтом А опускают его так, чтобы приблизить объектив к пластинке на 1-2 мм.

4. Вращая винт А, медленно поднимают тубус, наблюдая через окуляр за появлением в поле зрения микроскопа царапины, нанесенной на нижней стороне пластинки. Наводят микроскоп на четкое изображение этой царапины при помощи винтов А и В, записывают отсчет по микрометрическому винту. Измерения проводят не менее 3 раз и находят среднее значение отсчета.

5. Поднимая тубус микроскопа микрометрическим винтом В и отсчитывая при этом число полных оборотов его, наводят микроскоп на четкое изображение верхней царапины. Записывают число оборотов винта и отсчет по микрометрическому винту. Наводку повторяют несколько раз, определяют средний отсчет.

6. Определяют «кажущуюся» толщину  $x$  пластинки как разность отсчетов по микрометрическому винту, произведенных в пп. 4 и 5 (цена деления на барабанчике винта равна 0,002 мм).

7. По формуле (2) определяют показатель преломления  $n$  вещества пластинки.

8. Определяют ошибку измерения

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta x}{x},$$

где  $\Delta d$  – точность микрометра,

$\Delta x$  – цена деления барабанчика.

## Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон отражения света.
2. Сформулируйте закон преломления света.
3. Каков физический смысл показателя преломления вещества?

## Лабораторная работа 4

### Определение показателя преломления жидкости с помощью рефрактометра и скорости распространения света в веществе

При прохождении света через границу раздела двух сред луч света испытывает явление отражения и преломления (рис. 1).

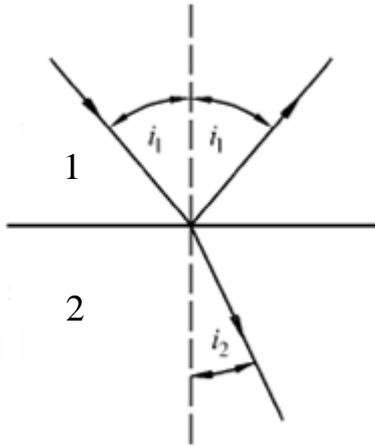


Рис. 1

Законы преломления света читаются следующим образом.

1. Преломленный луч лежит в одной плоскости с лучом падающим и перпендикуляром, восстановленным в точку падения.

2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данной пары веществ

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21}.$$

Величина  $n_{21}$  называется относительным показателем преломления второго вещества по отношению к первому.

Показатель преломления какого-нибудь вещества по отношению к вакууму называется абсолютным показателем преломления. Относительный показатель преломления двух веществ равняется отношению их абсолютных показателей:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Закон преломления может быть переписан в виде:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1},$$
$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2. \quad (1)$$

Обычно слово абсолютный опускают и говорят просто о показателе преломления вещества.

Из принципа Гюйгенса о распространении волнового фронта следует:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2},$$

где  $v_1$  и  $v_2$  – скорости распространения соответственно в первой и второй средах.

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2)$$

Показатель преломления двух веществ обратно пропорционален скорости распространения света в этих веществах.

Для вакуума показатель преломления равен 1, тогда, если положить в формуле (2)  $n_1 = 1$ ,  $v_1 = c$ , получим:

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{или} \quad v = \frac{c}{n}.$$

Следовательно, показатель преломления данного вещества показывает, во сколько раз скорость света в данной среде меньше, чем в вакууме.

Если свет проходит из среды с большим показателем преломления (оптически более плотной) в среду с меньшим показателем преломления (оптически менее плотную), то есть  $n_2 < n_1$ , то, как следует из формулы (1),  $i_1 < i_2$  – угол падения меньше угла преломления (рис. 2, а).

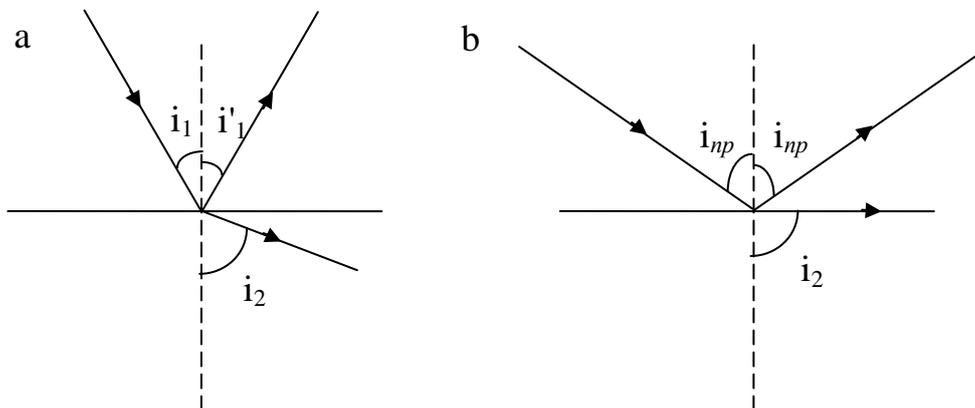


Рис. 2

При увеличении угла падения  $i_1$  угол преломления увеличивается. Очевидно, существует такой угол падения  $i_1 < \frac{\pi}{2}$ , при котором угол преломления равняется  $i_2 = \frac{\pi}{2}$  (рис. 2, б). Этот угол  $i_1$  называется предельным углом падения  $i_{np}$ .

Для предельного угла второй закон преломления имеет следующий вид:

$$\sin i_{np} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (3)$$

т.к.  $\sin i_2 = \sin \frac{\pi}{2} = 1$ .

Опыт показывает, что при угле падения  $i_1 > i_{np}$  преломленного луча не существует, и весь падающий на границу раздел двух сред свет отражается. Это явление носит название полного внутреннего отражения.

Так как световой луч обратим, то при прохождении из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную ( $n_1 < n_2$ ), очевидно, будет наблюдаться обратная картина: угол преломления меньше угла падения (рис. 3).

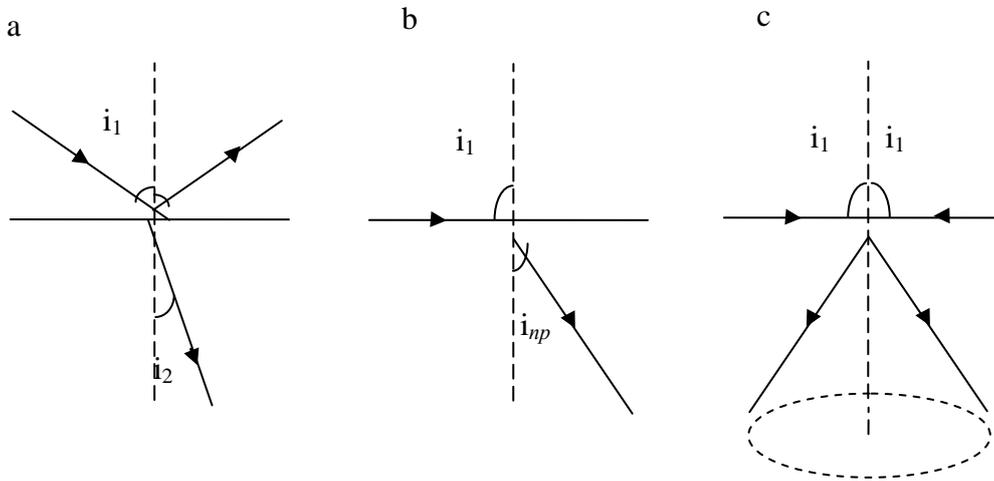


Рис. 3

Углу падения, равному  $\frac{\pi}{2}$ , соответствует угол преломления  $i_{2np} < \frac{\pi}{2}$ , называемый предельным углом преломления (рис. 3, b).

$$\sin i_{np} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (4)$$

Если на границу раздела двух сред из оптически менее плотной в среду оптически более плотную падает в одну точку сходящийся пучок лучей различных направлений (от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ ), то по второй среде такие световые конусы выходят так же из каждой точки.

Поставим на пути преломленных лучей линзу так, чтобы главная оптическая ось линзы совпадала с предельным лучом 1 (рис. 4). Тогда пучок параллельных предельных лучей соберется в фокусе F линзы и в точке F будет светлое пятно.

Для того, что выяснить, где соберутся за линзой все остальные лучи, выделим еще один произвольный пучок параллельных лучей 2.

Этот пучок параллельных лучей соберется в фокальной плоскости линзы. Среди этих лучей луч, прошедший через оптический центр линзы С, не преломится и пересечется с фокальной плоскостью справа от F.

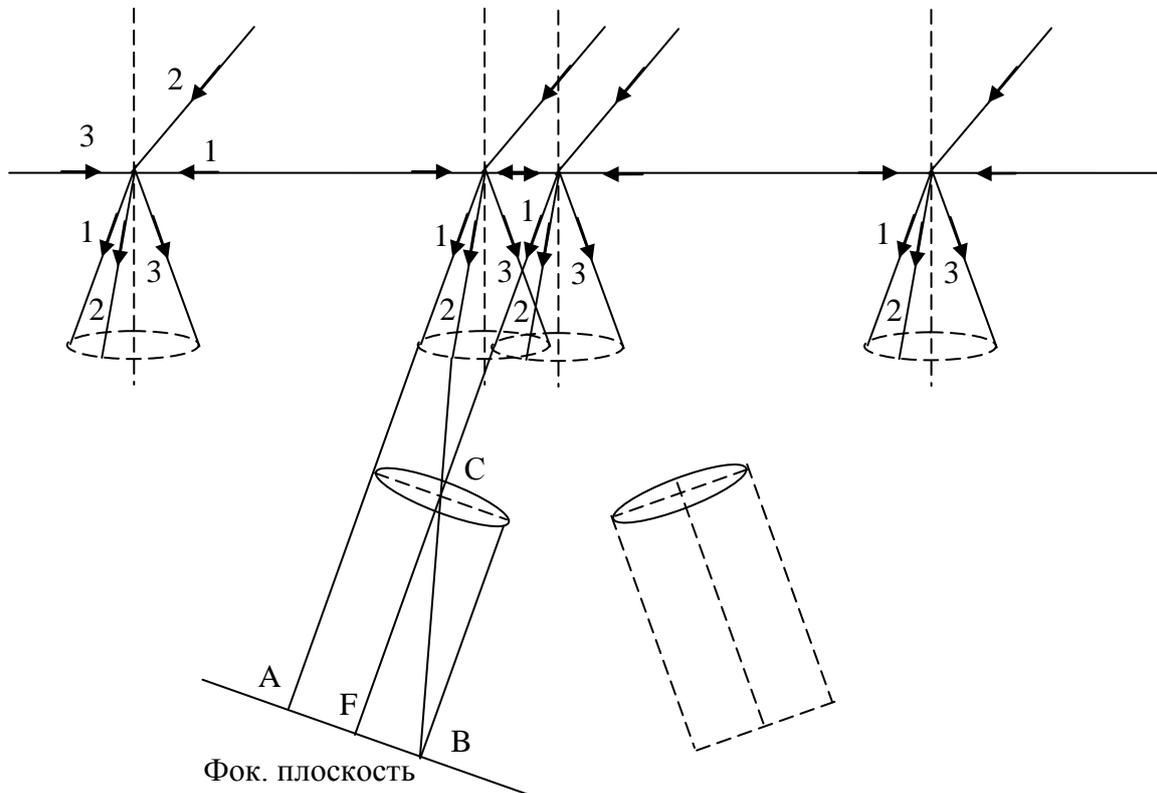


Рис. 4

Остальные лучи световых конусов дадут свет также справа от F. Значит, на экране в зрительной трубе мы видим участок поля FB светлым. Но лучей, идущих к оптическому центру линзы справа от главной оптической оси, нет. Следовательно, участок FA темный. При повороте зрительной среды против часовой стрелки граница света и тени будет смещаться от точки F в сторону точки A. При постепенном повороте трубы мы увидим, что все поле будет светлым. А в этот момент, когда главная оптическая ось линзы снова совпадает с предельным лучом 3, мы снова увидим половину поля светлой AF, а вторую половину темной FB. Угол поворота трубы от положения, в котором труба перпендикулярна границе раздела двух сред, зависит от величины предельного угла преломления, который соответствует определенному показателю преломления жидкости:

$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin i_{np}} = \frac{n_{cm}}{n_{ж}}, \quad n_{ж} = n_{cm} \sin i_{np},$$

где  $n_{ж}$ ,  $n_{cm}$  – показатели преломления жидкости и стекла соответственно.

Таким образом, на шкале отмечается не угол поворота трубы, а соответствующий ему показатель преломления жидкости. Шкала градуируется по предельным лучам (левым или правым для всех сред) (см. рис. 4).

На этом принципе основано устройство рефрактометра РЛЧ (рис. 5) – прибора, предназначенного для определения показателя преломления жидкостей.

Лучи света, отражаясь от зеркала, попадают в камеру прибора, состоящую из двух половин: верхняя 2 представляет осветительную призму, нижняя 3 – измерительную. Осветительная призма может быть откинута, и на ее матовую гипотенузную грань наносится исследуемая жидкость. Матовая грань осветительной призмы рассеивает лучи света, и они входят в исследуемую жидкость под разными углами и под разными углами падают на гипотенузную грань измерительной призмы. Гипотенузная грань измерительной призмы хорошо отполирована, лучи, прошедшие жидкость и падающие на эту грань, испытывают явление преломления.

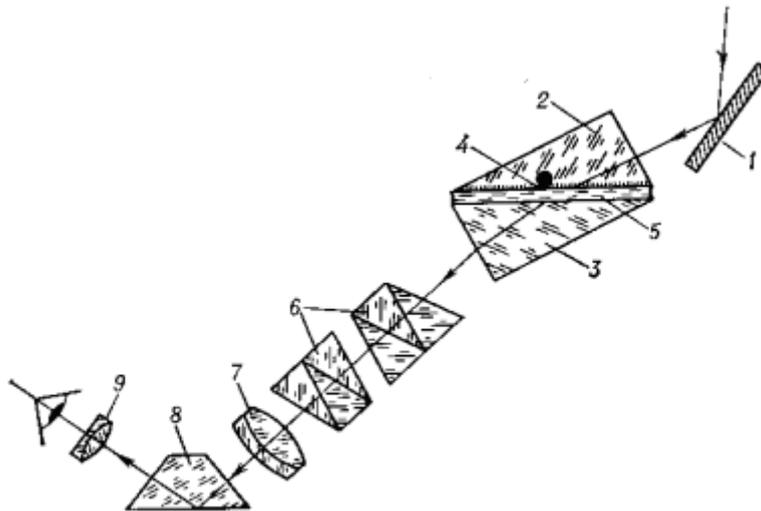


Рис. 5. Оптическая схема рефрактометра:

- 1 - осветительное зеркало; 2 - вспомогательная откидная призма;
- 3 - основная измерительная призма; 4 - матированная грань откидной призмы; 5 - исследуемая жидкость; 6 - призмы компенсатора; 7 - объектив зрительной трубы; 8 - поворотная призма; 9 - окуляр зрительной трубы

Так как показатель преломления измерительной призмы  $n_2$  больше показателя исследуемой жидкости  $n_1$ , то угол преломления меньше угла

падения и за гипотенузной гранью призмы образуются световые конусы. Предельный угол преломления определится положением границы светотени. Для наблюдения границы светотени применяется компенсатор, устраняющий цветное окрашивание.

Отсчетная система прибора состоит из металлической шкалы, которую необходимо рассматривать через лупу.

### Ход работы

1. Включают лабораторный фонарь и подключают осветительную лампу.

2. На поверхность осветительной призмы пипеткой наносят несколько капель исследуемой жидкости и равномерно распределяют по поверхности призмы. Осторожно закрывают нижнюю половинку камеры на замок. При этом гипотенузная грань измерительной призмы должна находиться в горизонтальном положении.

3. Глядя в окуляр, устанавливают зеркало так, чтобы свет от источника поступал в осветительную призму и освещал поле зрения.

4. Вращая винт и наблюдая в окуляр зрительной трубы, находят границу светотени. Винтом конденсатора устраняют окрашенность границ светотени. Если этого достичь не удастся, следовательно, жидкость недостаточно чиста. В таком случае жидкость на грань призмы наносят более тщательно.

5. Рукояткой точно совмещают границу светотени с перекрестием и находят значение по шкале коэффициентов преломления. Для этого смотрят в лупу и снимают отсчет с помощью штриха, нанесенного на пластинку и видимого в поле зрения лупы.

Измерения производятся для каждой из трех исследуемых жидкостей. Во избежание загрязнения призмы, после каждой жидкости необходимо протирать ее ацетоном и затем ватой.

## Определение скорости распространения света в веществе

Определив показатели преломления исследуемых жидкостей, вычисляют скорости распространения света в них по формуле:

$$v = c/n, \text{ где } c = 2,99793 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Для одного случая считают абсолютные и относительные погрешности.

## Контрольные вопросы

1. Что называется абсолютным и относительным показателем преломления?

2. Как связаны показатель преломления среды и скорость распространения света в ней?

## Лабораторная работа 5

### Проверка закона Малюса

Излучаемые атомами светящегося тела электромагнитные волны воспринимаются глазом как свет. Таким образом, в любой точке пространства, через которую проходит свет, совершаются колебания векторов напряженностей электрических и магнитных полей.

При распространении света векторы электрической  $\vec{E}$  и магнитной  $\vec{H}$  напряженностей взаимно перпендикулярны, а также оба перпендикулярны к лучу или направлению распространения колебания, т.е. вектору скорости  $\vec{v}$ . Исходя из вышесказанного, свет является поперечной волной и поэтому способен поляризоваться. При взаимодействии света с веществом переменное электрическое поле воздействует на отрицательно заряженные электроны атомов и молекул этого вещества, в то время как действие со стороны магнитного поля на эти заряженные частицы незначительно, поэтому в процессах распространения света главную роль играет вектор электрической напряженности  $\vec{E}$ . Если колебания вектора  $\vec{E}$  происходят в одной плоскости (рис. 1, а), то свет является плоско-поляризованным.

Солнце, лампы накаливания, ртутные лампы и т.д. не являются источниками плоско-поляризованного света, плоскость колебаний вектора  $\vec{E}$  в таких световых волнах непрерывно меняется (рис. 1, б). Такой свет называется естественным.

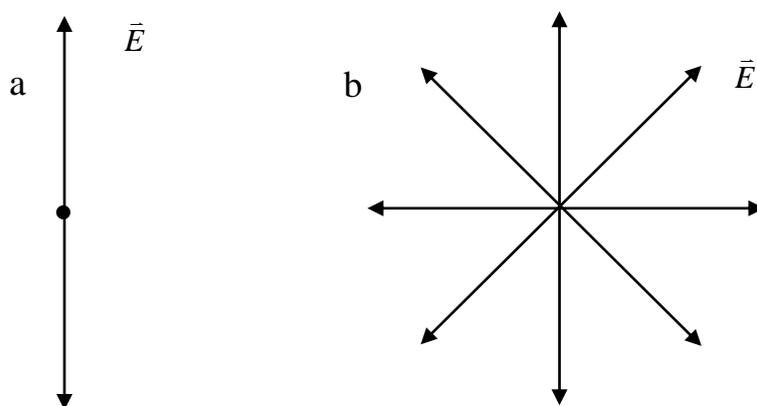


Рис. 1

Из естественного света можно получить плоско-поляризованный, если, например, пропустить свет через анизотропные прозрачные кристаллы (турмалин, исландский шпат). Эти кристаллы характеризуются двойным лучепреломлением (рис. 2).

Каждому падающему лучу соответствуют два преломленных. Один из преломленных лучей подчиняется обычному закону преломления света и называется обыкновенным (луч  $O$ ). Показатель преломления  $n_0$  обыкновенного луча не зависит от направления распространения его в кристалле.

Другой луч, необыкновенный (луч  $e$ ), распространяется с различными скоростями в зависимости от направления в кристалле. Оба эти луча плоскополяризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях.

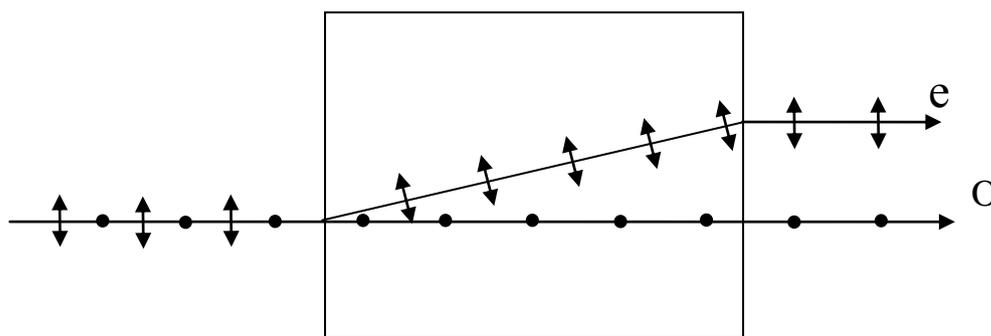


Рис. 2

У анизотропных кристаллов имеется направление, распространяясь вдоль которого лучи не раздваиваются – это оптическая ось кристалла. Плоскость, содержащая падающий луч и оптическую ось, – главная оптическая плоскость.

В необыкновенном луче вектор  $\vec{E}$  колеблется в главной оптической плоскости кристалла, а плоскость колебаний обыкновенного луча ей перпендикулярна. В некоторых кристаллах один из лучей поглощается сильнее другого. Это явление дихроизма. Кристаллы герпатита (сернокислый иодид хинин) поглощают полностью обыкновенный луч (размер кристалликов  $\sim 0,1$  мм).

Устройства, с помощью которых можно из естественного света получить поляризованный, называются поляризаторами. Обычно на полимерную пленку наносят кристаллики герпатита, и при прохождении света через эту пленку свет поляризуется. Эта пленка называется поляроидом.

В настоящее время для получения плоско-поляризованного света применяются поляроиды.

Рассмотрим установку, состоящую из источника света  $S$ , двух поляроидов  $\Pi$  и  $A$  и люксметра с фотоэлементом (рис. 3).

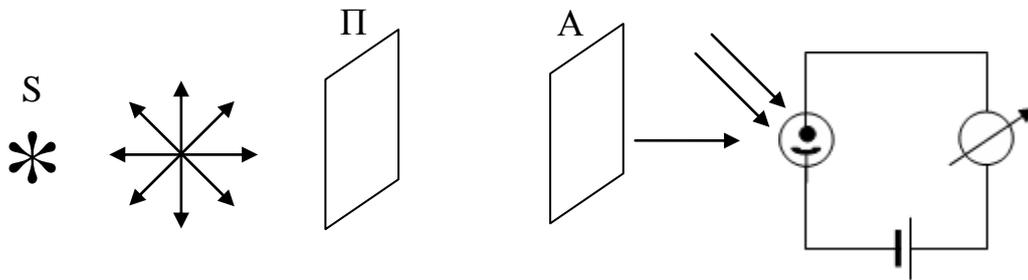


Рис. 3

Пройдя сквозь первый поляризатор (поляризатор П), свет становится плоскополяризованным. Пусть  $\vec{E}_\Pi$  (рис. 4) – амплитуда вектора напряженности колебания, пропускаемого поляризатором.

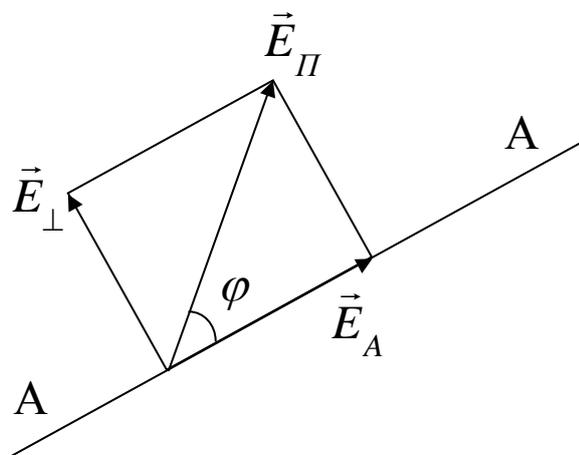


Рис. 4

Оптическая плоскость второго поляриоида (анализатора А) ориентирована таким образом, что проходят колебания в направлении АА. Амплитуду  $\vec{E}_\Pi$  можно разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие  $\vec{E}_A$  и  $\vec{E}_\perp$ . Колебания, перпендикулярные направлению АА, не проходят через анализатор.

На рис. 4 видно, что амплитуда выходящего из анализатора света  $E_A = E_\Pi \cos \varphi$ .

Так как интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды, то по закону Малюса

$$I = I_0 \cos^2 \varphi,$$

где  $I_0$  – интенсивность света, падающего на анализатор;

$I$  – интенсивность света, выходящего из анализатора;

$\varphi$  – угол между главными оптическими плоскостями анализатора и поляризатора.

**Цель работы** – проверка закона Малюса.

## Ход работы

Вращая анализатор, добиваются максимального отброса стрелки люксметра. Записывают деление на лимбе анализатора и показание люксметра (отн. ед.).

Вращают анализатор на  $10^0$  и снова записывают показания люксметра и угол. Измерения повторяют до значения угла  $180^0$ .

Полученные данные заносят в таблицу.

№ п/п	$\varphi$	$I$ (отн. ед.)	$\cos \varphi$	$\cos^2 \varphi$
1	$0^0$			
2	$10^0$			
3	$20^0$			
4	$30^0$			
5	$40^0$			
6	$50^0$			
7	$60^0$			
8	$70^0$			
9	$80^0$			
10	$90^0$			
11	$100^0$			
12	$110^0$			
13	$120^0$			
14	$130^0$			
15	$140^0$			
16	$150^0$			
17	$160^0$			
18	$170^0$			
19	$180^0$			

По полученным данным строят график зависимости интенсивности света ( $I$ ) от  $\cos^2 \varphi$ .

## Контрольные вопросы

1. Как можно получить плоско-поляризованный свет?
2. В чем состоит явление двойного лучепреломления?
3. Что такое оптическая ось и главная оптическая плоскость в кристалле?

## Лабораторная работа 6

### Определение постоянной вращения сахара

Излучаемые атомами светящегося тела электромагнитные волны воспринимаются глазом как свет. В любой точке пространства, через которую проходит свет, совершаются колебания векторов напряженностей электрических и магнитных полей.

В световой волне векторы электрической  $\vec{E}$  и магнитной  $\vec{H}$  напряженностей взаимно перпендикулярны, а также оба перпендикулярны к лучу или направлению распространения колебания, т.е. вектору скорости  $\vec{v}$  (рис. 1). Исходя из вышесказанного, свет является поперечной волной и поэтому способен поляризоваться, проходя через некоторые анизотропные вещества (например, кристаллы кальцита или турмалина).

В плоско-поляризованной волне плоскость колебания вектора электрической напряженности, т.е. плоскость в которой лежат векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{v}$ , имеет для каждого данного момента времени одно определенное положение.

Плоскостью поляризации называют плоскость, перпендикулярную плоскости колебания вектора  $\vec{E}$  и содержащую вектор  $\vec{v}$ . Вектора напряженности  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в луче естественном (неполяризованном) быстро и хаотично меняют свое направление, хотя и остаются перпендикулярным вектору  $\vec{v}$ , поэтому не имеют определенной плоскости колебаний.

Определенным образом вырезанная и склеенная призма из кальцита (призма Николя) или пластинка из турмалина преобразует падающий на нее естественный луч в луч поляризованный. Подобное приспособление носит название поляризатора или анализатора (в зависимости от места, занимаемого в приборах).

Если на пути плоско-поляризованного луча интенсивностью  $I_1$  поставить анализатор, плоскость поляризации которого составляет с плоскостью поляризации луча угол  $\alpha$ , то по закону Малюса интенсивность луча, прошедшего через анализатор, будет равна:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha . \quad (1)$$

Отсюда, в частности, следует, что при  $\alpha = 0^0$  поляризованный свет проходит анализатор без потерь, а при  $\alpha = 90^0$  поляризованный свет пройти через анализатор не может (зрительное поле темнеет).

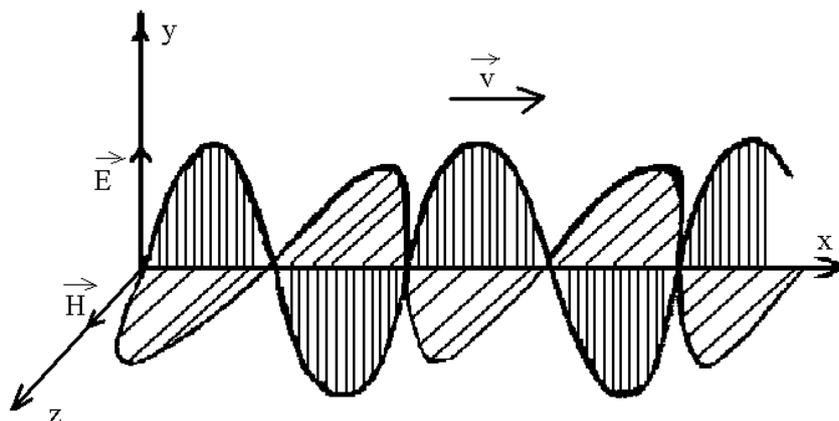


Рис. 1

При прохождении поляризованного света через слои некоторых веществ, среди которых имеются как изотропные, так и кристаллические, плоскость колебаний поворачивается на некоторый угол. К таким «оптически активным веществам» относятся кварц, скипидар, раствор сахара. Опыт показывает, что угол поворота  $\varphi$  плоскости колебаний пропорционален пути  $\ell$  луча в растворе активного вещества и концентрации  $k$  этого раствора, т.е.

$$\varphi = \alpha k \ell , \quad (2)$$

где  $\alpha$  – вращение, вызванное столбом жидкости длиной 1 м при концентрации 1 кг вещества на 1 м<sup>3</sup> жидкости, называемое удельным вращением растворенного вещества или постоянной вращение.

Явление вращения плоскости колебаний находит практическое применение при измерении концентрации сахара в растворе. Такие измерения производятся в медицине и в сахарной промышленности с помощью специальных приборов – сахариметров.

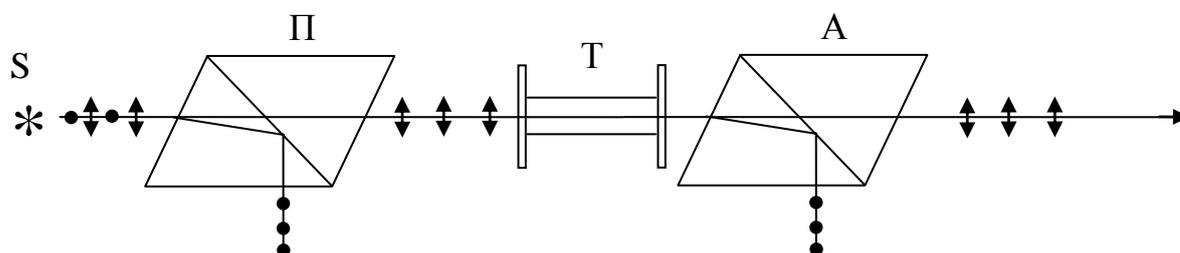


Рис. 2

Схема сахариметра приведена на рис. 2. На пути естественного луча помещается призма Николя – поляризатор (П). Как уже известно, из нее выйдет поляризованный луч. При отсутствии раствора активного вещества в трубке (Т) устанавливают вторую призму Николя – анализатор (А) – так, чтобы ее плоскость поляризации была перпендикулярна к плоскости поляризатора. Поляризованный луч при этом погасится. Наблюдатель света не видит, однако если между этими скрещенными николями поместить оптически активное вещество, например раствор сахара, то свет начнет проходить через анализатор.

В самом деле, слой активного вещества повернет плоскость поляризации луча, и она не будет уже перпендикулярной к плоскости поляризации анализатора. Угол поворота плоскости колебаний  $\varphi$  сахарным раствором, очевидно, равен тому углу, на который следует повернуть анализатор, чтобы опять погасить свет.

Определяется угол  $\varphi$  по специальной шкале прибора. Зная постоянную вращения  $\alpha$ , длину трубки  $l$  с раствором и угол вращения плоскости колебаний  $\varphi$ , находят из формулы (2) концентрацию сахара в растворе.

$$k = \frac{\varphi}{\alpha l}. \quad (3)$$

Ввиду того, что установка анализатора на темноту не может быть произведена очень точно, в настоящее время чаще работают с так называемым полутеневым анализатором.

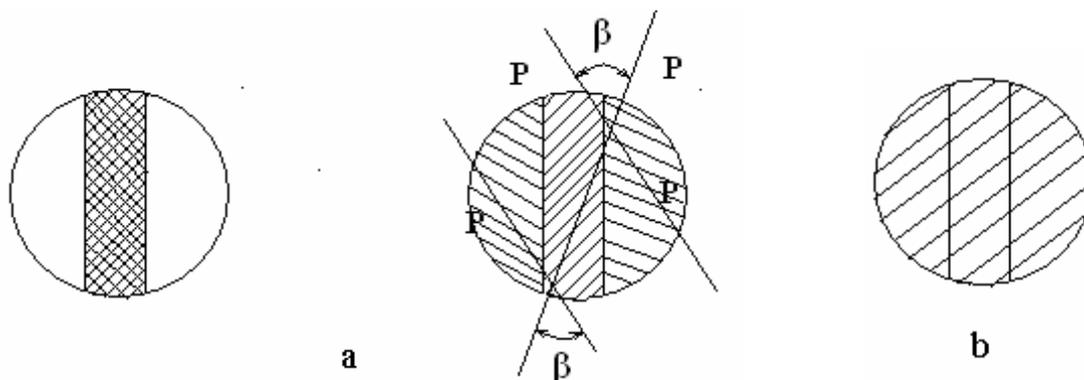


Рис. 3

В круговом поляриметре СМ поле зрения разделено на три части введением в оптическую систему поляризатора – кварцевой пластинки, которая занимает только центральную часть поля зрения. Угол между направ-

лением плоскости поляризации поляризатора и оптической осью кварцевой пластинки составляет несколько градусов (рис. 3, а),  $\beta = 5 \dots 7^\circ$ . Если ось анализатора перпендикулярна биссектрисе угла  $\beta$ , то центральное поле и крайние части будут одинаково освещены (рис 3, б).

Это положение одинаковой освещенности тройного поля используется в работе для определения угла  $\varphi$  сначала без раствора сахара между николями, затем с ним.

Для проверки правильности уравнивания полей следует повернуть анализатор на несколько градусов вправо. При этом ось анализатора окажется перпендикулярной оси кварцевой пластинки, вследствие чего центральная полоса потемнеет, а края поля посветлеют (см. рис. 3, а). При повороте анализатора влево его ось составит прямой угол с осью поляризатора. Это, в свою очередь, приведет к просветлению центра и потемнению краев поля. Следовательно, уравнивание полей происходит тогда, когда центр и края поля зрения меняют освещенность со света на темноту при переходе через положение одинаковой освещенности тройного поля.

## Ход работы

1. Включают лампочку осветителя (подключив осветитель к сети, нажмите выключатель на станине прибора, рядом с лампой).

2. Откинув шторку, убеждаются в отсутствии в приборе трубки для растворов.

3. Смотря в зрительную трубу, перемещают муфту и связанную с ней окулярную линзу, добиваясь резкого изображения тройного поля. При этом должна быть картина, изображенная на рис. 3, а.

4. Вращением фрикции добиваются одновременного затемнения тройного поля (проверьте, как сказано выше, правильность уравнивания освещенности рис. 3, б).

5. Определяют, на сколько полных градусов повернут нуль нониуса по отношению к нулю лимба, по штриху нониуса, совпадающему с градусным штрихом лимба, отсчитывают доли градуса. Цифра 2 нониуса соответствует  $0,2^\circ$ ; 4 –  $0,4^\circ$ . Если нулевой штрих нониуса оказался смещенным относительно нулевого штриха лимба по часовой стрелке, то отсчет приписывается знак «+», если против часовой стрелки, то знак «-». На лимбе имеются два нониуса. Отсчет производится по нониусу № 1. Каждый отсчет повторяется три раза, берется среднее значение. Данные заносятся в таблицу.

6. Берут трубку для раствора, измеряют длину столба жидкости (длину трубки), затем отвинчивают головку, осторожно снимают покровное стекло и наливают в трубку раствор, соответствующий наименьшей концентрации. Установив трубку, наводят окуляр на резкость тройного поля и только после этого производят отсчет по нониусу № 1.

7. Производят такие же измерения с остальными растворами в порядке возрастания концентрации сахара. Каждый отсчет повторяется три раза и берется среднее значение.

Составляют таблицу и заносят в нее все данные измерения и их обработки.

№ опыта	$N_0$	$N$	$\varphi = N - N_0$	$k$	$\alpha$
1					
2					
3					

8. Строят график зависимости угла поворота от концентрации  $\varphi(k)$ .

9. Исходя из формулы (2) и данных измерений, вычисляют три значения постоянной вращения  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  и среднее значение  $\alpha_{\text{ср}}$ .

Вычисляют ошибки измерений  $\Delta\alpha_{\text{ср}}$  и  $\Delta\alpha_{\text{ср}} / \alpha_{\text{ср}}$ . Результаты расчета представляют в виде

$$\alpha_{\text{ист}} = (\alpha_{\text{ср}} \pm \Delta\alpha_{\text{ср}}) .$$

### Контрольные вопросы

1. Какой свет называется плоско-поляризованным?
2. Что называется плоскостью поляризации?
3. Сформулируйте закон Малюса.
4. Какие вещества называются оптически активными?
5. Как устроен поляриметр СМ?

## Оглавление

Лабораторная работа 1	
Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона .....	3
Лабораторная работа 2	
Определение длины волны с помощью дифракционной решетки .....	9
Лабораторная работа 3	
Измерение показателя преломления стеклянной пластинки с помощью микроскопа .....	14
Лабораторная работа 4	
Определение показателя преломления жидкости с помощью рефрактометра и скорости распространения света в веществе .....	17
Лабораторная работа 5	
Проверка закона Малюса .....	23
Лабораторная работа 6	
Определение постоянной вращения сахара .....	27