

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ РАСТИТЕЛЬНЫХ
ПОЛИМЕРОВ»**

А.А.Абрамович, М.Н.Полянский

ФИЗИКА

**ГОНИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК
ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА**

**Учебно-методическое пособие
к лабораторной работе № 4-И**

**Санкт-Петербург
2014**

УДК 537(072)

Абрамович А.А., Полянский М.Н. Физика. Гониометрические измерения характеристик оптического стекла: учебно-методическое пособие к лабораторной работе № 4-И/ под ред. проф. А.Л.Ашкалунина; СПбГТУРП.-СПб., 2014. -19 с.

Учебно-методическое пособие содержит описание лабораторной работы по оптике с кратким описанием теории. Предназначено для индивидуального студенческого практикума.

Рецензент: профессор кафедры физики СПбГТУРП, д-р. физ.-мат. наук В.И. Лейман.

Подготовлено и рекомендовано к печати кафедрой физики Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров (протокол № 7 от 11.06.14).

Утверждено к изданию методической комиссией факультета автоматических систем управления технологическими процессами СПбГТУРП (протокол № 6 от 26.06.14).

© Санкт-Петербургский государственный
технологический университет
растительных полимеров, 2014

ВВЕДЕНИЕ

В научных исследованиях используется широкий класс оптических приборов различного назначения, среди которых можно выделить:

- 1) приборы для получения и изучения изображения объектов исследования: фотографические системы, микроскопы, телескопы;
- 2) спектральные приборы для исследования оптических спектров: спектрографы, спектрометры, спектрофотометры;
- 3) интерференционные приборы для прецизионных измерений геометрических и оптических характеристик объектов.

Особенностью перечисленных приборов является использование в них деталей и элементов, выполненных из оптического стекла. Выдающийся советский ученый-оптик академик С.И.Вавилов говорил, что стекло – это «основной вещественный материал оптики».

Оптическое бесцветное стекло представляет собой сложное по химическому составу неорганическое вещество в затвердевшем аморфном состоянии.

Первым отличительным признаком оптического стекла от любого технического стекла является высокая однородность. Вторым отличительным признаком оптического стекла считается его высокая прозрачность. Требования, предъявляемые к качеству оптического стекла, достигаются тщательным отбором исходных материалов и специальными технологическими приемами варки стекла и последующей термической обработки. Следует отметить, что технологией производства оптического стекла владеют лишь промышленно развитые страны. Основоположник советской оптической науки и промышленности академик Д.С.Рожественский писал: «Без оптического стекла нет ни познания природы, ни власти над ней».

Из вышеизложенного ясно, что не менее высокие требования предъявляются к методам измерения характеристик оптического стекла, важнейшей из которых является показатель преломления (ПП) стекла.

Поскольку ПП зависит от длины волны излучения, принято «привязывать» его к какой-то определенной характерной длине волны. Зависимость показателя преломления стекла от длины волны называется дисперсией стекла $n=f(\lambda)$

Для измерения показателя преломления и дисперсии применяются следующие методы:

- 1) гониометрические;
- 2) рефрактометрические;
- 3) иммерсионные;
- 4) интерференционные.

Для проведения измерений из стекла изготавливают специальные образцы, размеры и форма которых зависят от используемых методов измерений.

Для гониометрического метода, которому и посвящена настоящая работа, образец изготавливают в виде призмы, поэтому предварительно рассмотрим ход лучей в призме.

Прохождение света через призму

Рассмотрим прохождение узкого монохроматического светового луча через призму (рис. 1). Угол θ между преломляющими гранями призмы AB и BC называется преломляющим углом, линия пересечения граней – преломляющим ребром, а плоскость, перпендикулярная к преломляющему ребру, – главным сечением призмы. Если падающий луч лежит в главном сечении призмы, то вышедший из призмы луч также находится в этом сечении. Угол α между направлениями падающего и вышедшего лучей называют углом отклонения.

На рис. 1 видно, что углы падения i_1 , i_3 и преломления i_2 , i_4 связаны с преломляющим углом призмы θ и углом отклонения луча α следующим соотношением:

$$\alpha = (i_1 - i_2) + (i_4 - i_3) = i_1 + i_4 - (i_2 + i_3) \quad (1)$$

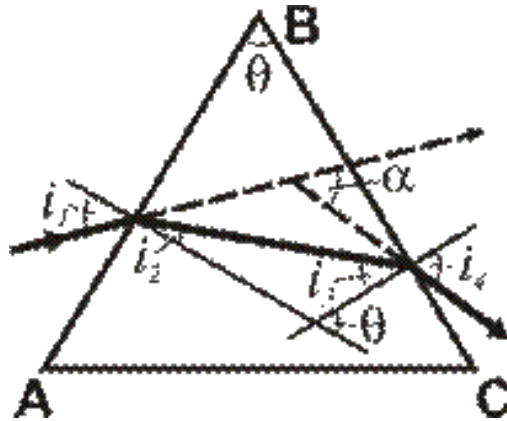


Рис. 1. Прохождение света через призму

Объединив эти выражения, получим

(2)

Обозначим показатель преломления призмы через n , а окружающей призму среды – через n_0 . Согласно закону преломления

$$\frac{n}{n_0} = \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{\sin i_4}{\sin i_3} \quad (3)$$

откуда

$$i_1 = \arcsin\left(\frac{n}{n_0} \sin i_2\right)$$

$$i_4 = \arcsin\left(\frac{n}{n_0} \sin i_3\right) = \arcsin\left[\frac{n}{n_0} \sin(\theta - i_2)\right]$$

Подставив эти значения углов i_1 и i_4 в формулу (2), получим угол отклонения луча, лежащего в главном сечении, как функцию угла i_2 :

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{n}{n_0} \sin i_2\right) + \arcsin\left[\frac{n}{n_0} \sin(\theta - i_2)\right] - \theta$$

Угол отклонения будет минимальным при выполнении условия

$$\frac{d\alpha}{di_2} = \frac{(n/n_0)\cos i_2}{\sqrt{1 - [(n/n_0)\sin i_2]^2}} - \frac{(n/n_0)\cos(\theta - i_2)}{\sqrt{1 - [(n/n_0)\sin(\theta - i_2)]^2}} = 0.$$

Это условие выполняется в двух случаях:

$$1) \theta = 0; \quad 2) \theta - i_2 = i_2.$$

Поскольку $\theta \neq 0$, физический смысл имеет лишь второе решение, согласно которому $\theta = 2i_2$, следовательно, с учетом (1), $i_2 = i_3$.

Отсюда вытекает, что *угол отклонения α минимален при симметричном относительно граней ходе лучей в призме*. В этом случае луч идет параллельно основанию призмы, и выражение (4) имеет вид:

$$\alpha_{\min} = 2 \arcsin \left(\frac{n}{n_0} \sin \frac{\theta}{2} \right) - \theta \quad (5)$$

Из этого соотношения легко найти относительный показатель преломления призмы:

$$\frac{n}{n_0} = \frac{\sin[(\theta + \alpha_{\min})/2]}{\sin(\theta/2)}. \quad (6)$$

Таким образом, показатель преломления призмы может быть определен путем измерения углов θ и $\alpha_{\min}$. Для этой цели используются высокоточные оптические приборы – гониометры.

Описание гониометра Г5

Гониометр служит для точного измерения углов и находит широкое применение в оптических лабораториях. С помощью гониометра можно определять показатели преломления и преломляющие углы призм и кристаллов, исследовать параметры дифракционных решеток, измерять длины волн спектральных линий и т. д. В настоящей работе этот прибор применяется для измерения показателя преломления и дисперсии стеклянных призм.

Гониометр Г5 состоит из следующих основных частей (рис.2): коллиматора 3, столика 7, алидады 17 со зрительной трубой 12, которые крепятся на массивном основании 23. На столике 7 размещается исследуемый предмет (призма). Наклон столика относительно вертикальной оси регулируется винтами 8.

Коллиматор служит для получения параллельного пучка лучей. Он состоит из объектива 5 и щели 1, ширина которой (от 0 до 2 мм) регулируется микрометрическим винтом 2. Коллиматор крепится неподвижно на основании гониометра. Настройка коллиматора на параллельность пучка производится винтом 4.

Зрительная труба состоит из объектива 9 и окуляра 13. Объективы коллиматора и зрительной трубы одинаковы. Фокусировка трубы производится винтом 11. Наклон коллиматора и зрительной трубы к горизонтальной оси изменяется винтами 6 и 10 соответственно. Схема окуляра зрительной трубы приведена на рис. 3а. Свет от лампы *Л* проходит защитную стеклянную пластинку *П* и попадает на автоколлимационную сетку *А*, содержащую две взаимно перпендикулярные щели (рис.3б). Свет, прошедший через сетку, попадает на две прямоугольные призмы *Р*, на гипотенузные грани которых нанесен полупрозрачный слой с коэффициентом отражения 50 %.

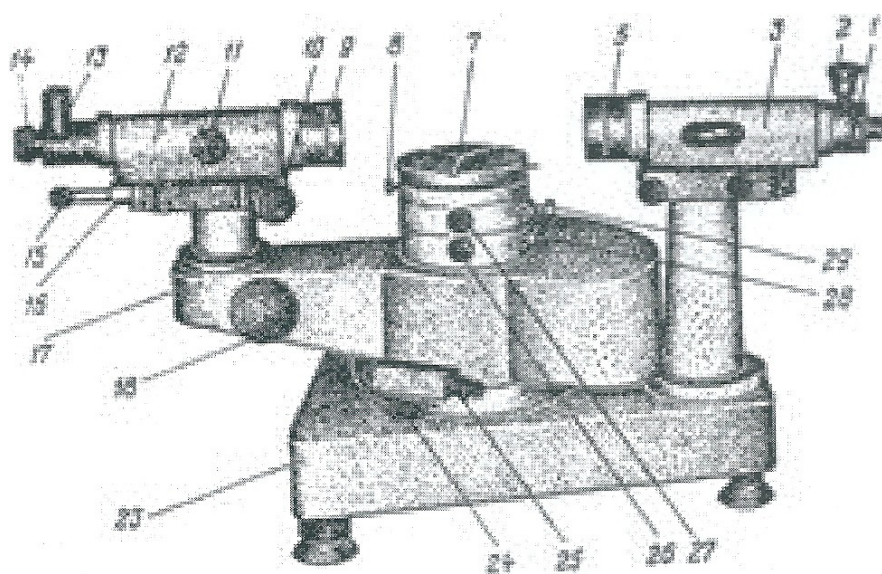
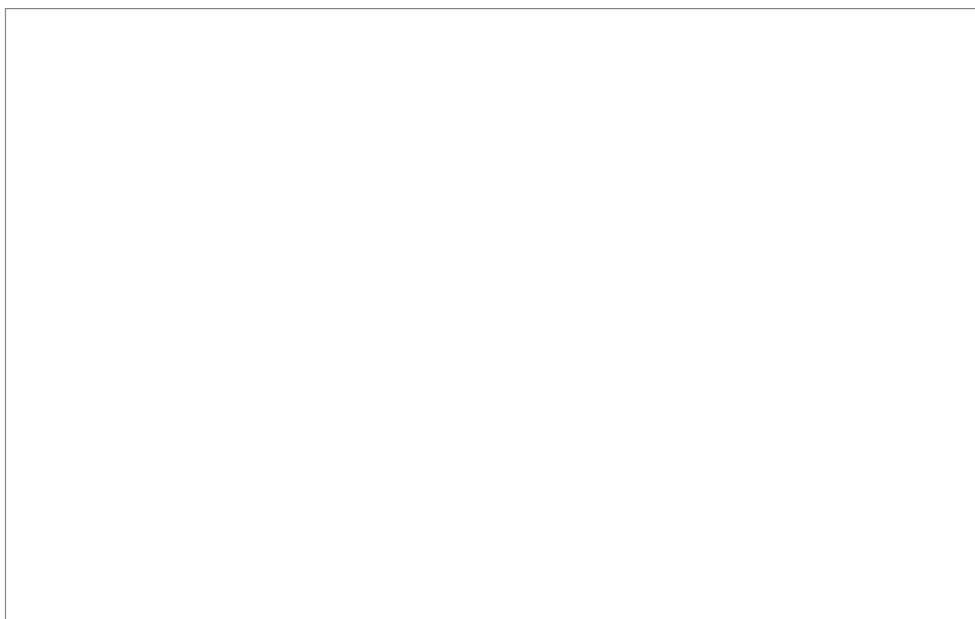


Рис. 2. Внешний вид гониометра Г5: а – вид слева; б – вид справа

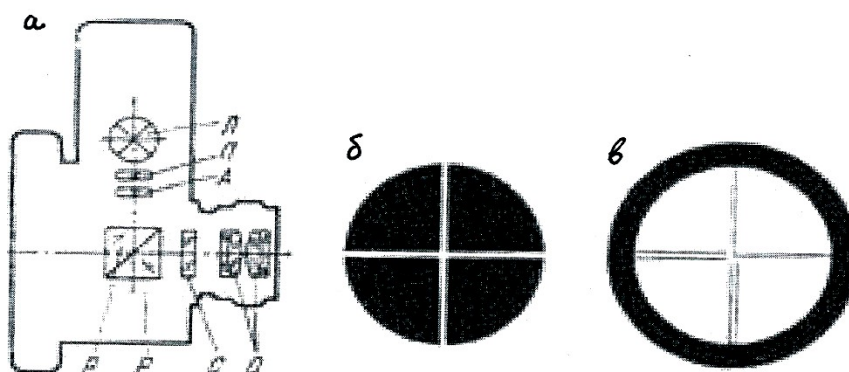


Рис. 3. Окуляр зрительной трубы: *а* – общий вид в разрезе; *б* – автоколлимационная сетка; *в* – отсчетный крест окуляра

Светящийся крест можно увидеть невооруженным глазом, если заглянуть в зрительную трубку со стороны столика гониометра. При юстировке гониометра на его столик ставится предмет с отражающей плоской поверхностью. После отражения от нее пучок лучей возвращается назад в зрительную трубу. В этом случае светящийся крест можно увидеть через окуляр трубы. Кроме того, в окуляре имеется еще одна сетка *С*, на которой изображен отсчетный крест (рис. 3в). Совмещенные изображения обоих крестов рассматриваются через окулярные линзы *О*. Резкость видимого изображения отсчетного креста регулируется вращением оправы окуляра 14 (см.рис. 2).

Важнейшим узлом гониометра является устройство, служащее для отсчета угла поворота зрительной трубы вокруг вертикальной оси, проходящей через центр столика. На этой оси крепится прозрачное кольцо (лимб), расположенное в корпусе прибора. На поверхности лимба нанесена шкала с

делениями. Лимб разделен на 1080 делений. Цена деления 20'. Оцифровка делений произведена через 1°. Шкалу лимба можно наблюдать через окуляр отсчетного устройства 16 при включенном освещении прибора. Выключатель 22 расположен на нижней части основания. Резкость изображения шкалы регулируется вращением оправы окуляра 15.

Оптическая система отсчетного устройства собрана так, что через окуляр можно наблюдать изображения штрихов двух диаметрально противоположных участков лимба, причем одно изображение прямое, а другое – обратное (рис.4).

Кроме того, оптическая система позволяет перемещать эти изображения друг относительно друга, оставляя в покое как лимб, так и алидаду со зрительной трубой.

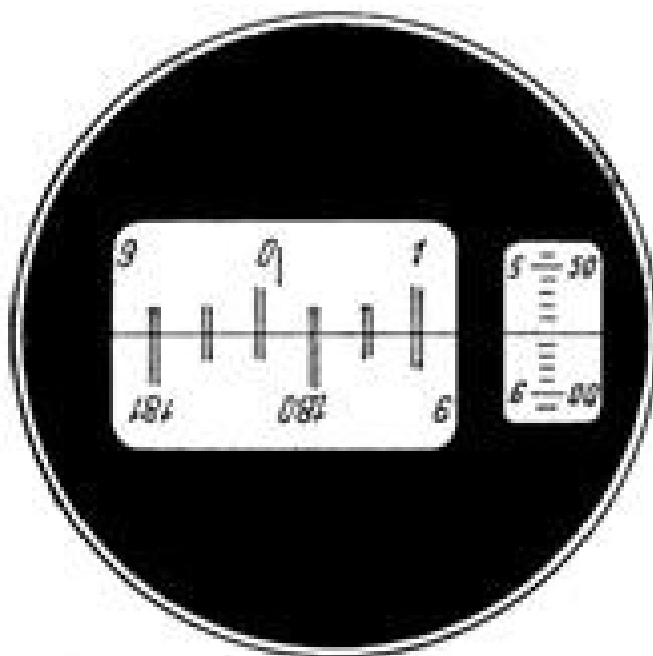


Рис. 4. Поле зрения отсчетного устройства гониометра Г5

Это перемещение изображений измеряется при помощи оптического микрометра. Шкала микрометра рассчитана таким образом, что при перемещении ее на 600 делений верхнее изображение штрихов лимба смещается относительно нижнего на $10'$. Следовательно, цена деления шкалы микрометра $1''$.

Поле зрения отсчетного микроскопа приведено на рис.4. В левом окне наблюдаются изображения диаметрально противоположных участков лимба и вертикальный индекс для отсчета градусов, в правом окне – деления шкалы оптического микрометра и горизонтальный индекс для отсчета минут и секунд.

Чтобы снять отсчет угла по лимбу, необходимо при помощи оптического микрометра точно совместить между собой изображения верхних и нижних штрихов лимба в левом окне окуляра отсчетного микроскопа. Эта операция проводится вращением маховичка оптического микрометра 18(см.рис. 2). Число градусов равно видимой ближайшей левой от вертикального индекса цифре (см.рис. 4). Число десятков минут равно числу интервалов, заключенных между верхним штрихом, который соответствует числу отсчитанных градусов, и нижним оцифрованным штрихом, отличающимся от верхнего на 180° . Число единиц минут отсчитывается по шкале микрометра в правом окне по левому столбцу чисел, число десятков секунд – по правому. Число единиц секунд равно числу делений между штрихами – от отсчитанного числа десятков секунд до неподвижного горизонтального индекса. Положение, показанное на рис. 4, соответствует отсчету $0^\circ 15' 55''$. Устройство отсчета гониометра Г5 обеспечивает точность измерения угла не хуже $5''$.

Для удобства экспериментатора в гониометре Г5 предусмотрено несколько вариантов относительного вращения столика, алидады со зрительной трубой и лимба.

1. Алидада вращается относительно лимба и столика либо грубо от руки, либо (при зажатом винте 24) точно с помощью микрометрического винта 25(см.рис.2).

2.Такое же вращение алидады, но вместе с лимбом и столиком, производится, если рычажок 20 находится в нижнем положении. Для возвращения его в верхнее положение надо нажать рычажок 19.

3.Лимб вращается относительно столика и алидады винтом 21 (рычажок 20 в нижнем положении).

4.Вращение лимба вместе со столиком относительно алидады производится микрометрическим винтом 28 при зажатом винте 26 (рычажок 20 в верхнем положении).

5.Столик вращается относительно алидады и лимба грубо от руки при свободных винтах 26 и 27 и точно — микрометрическим винтом 29 при зажатом винте 27 (рычажок 20 в верхнем положении).

Юстировка гониометра

Гониометр требует тщательной юстировки, которая заключается в установке зрительной трубы на бесконечность, в установке оптической оси трубы перпендикулярно оси вращения прибора и в установке коллиматора на параллельный пучок лучей.

Установка трубы на бесконечность. Для установки трубы на бесконечность нужно установить отсчетный крест (см. рис.3в) в общей фокальной плоскости объектива и окуляра. Установка креста в фокальной плоскости окуляра, как уже отмечалось, производится вращением оправы 14 (см. рис. 2). Для установки креста в фокальной плоскости объектива следует приложить к его оправе плоскопараллельную стеклянную пластинку. При этом в поле зрения окуляра возникает изображение светящегося креста автоколлимационной сетки окуляра. Вращением винта 11 необходимо добиться максимальной резкости этого изображения. Обе сетки окуляра А и С (см.рис.3а) расположены на строго одинаковых расстояниях от гипотенузных

граней призм P , поэтому их одновременное наблюдение в окуляре возможно только в случае, когда фокальные плоскости объектива и окуляра совпадают (труба настроена на бесконечность).

Установка оптической оси трубы перпендикулярно оси вращения прибора. При юстировке оптической оси трубы на столике гониометра устанавливается плоскопараллельная стеклянная пластинка. Лучше всего ее установить так, чтобы ее плоскости были параллельны линии, соединяющей два установочных винта 8 столика 7. Зрительную трубу устанавливают на глаз перпендикулярно плоскости пластинки. Медленно вращая установочный винт столика, перпендикулярный плоскости пластинки, и слегка поворачивая столик вправо и влево, добиваются того, чтобы в поле зрения окуляра трубы попал светящийся автоколлимационный крест. Светящийся крест следует совместить с отсчетным крестом окуляра. Затем поворачивают зрительную трубу на 180° при неподвижном столике. После поворота изображения крестов могут не совпасть. Расхождение изображений следует устранить наполовину прежним винтом столика и наполовину установочным винтом 10 зрительной трубы. После этого еще раз поворачивают трубу на 180° , и если установка нарушается, ее снова восстанавливают тем же путем. Легко видеть, что расположение светящегося креста не изменяется при повороте алидады на 180° лишь в том случае, если оптическая ось зрительной трубы перпендикулярна оси вращения прибора. На этом регулировка зрительной трубы заканчивается.

Установка коллиматора. Щель коллиматора должна быть установлена в фокальной плоскости объектива, для того чтобы пучок выходящих из коллиматора лучей был параллельным. Для этого освещают щель светом помещенной против нее лампы и направляют на коллиматор предварительно установленную на бесконечность зрительную трубу. Наблюдая щель через трубу и вращая винт 4, добиваются наиболее четкого изображения щели.

Для установки оптической оси коллиматора перпендикулярно оси вращения прибора следует наклонять коллиматор при помощи винта 6 до тех

пор, пока изображение щели в поле зрения трубы не расположится симметрично относительно отсчетного креста. На этом юстировка гониометра заканчивается.

Образцы стекла, подлежащие исследованию на гониометре, должны быть изготовлены в виде призм.

Установка призмы. В настоящей работе гониометр применяется для измерения преломляющих углов призм и определения зависимости показателя преломления от длины волны (дисперсии). Используются призмы, сделанные из разных сортов стекла.

Призма помещается на столике гониометра и должна быть установлена так, чтобы ее исследуемое преломляющее ребро было параллельно оси вращения гониометра, т. е. чтобы ось вращения одновременно была параллельна двум рабочим граням призмы. Для этого устанавливают призму в центр столика отъюстированного гониометра таким образом, чтобы одна из преломляющих граней была параллельна одному из установочных винтов 8 (см. рис.2). Поворачивая столик и вращая второй установочный винт (перпендикулярный выбранной грани), добиваются того, чтобы указанная грань оказалась перпендикулярной оптической оси трубы (по совмещению автоколлимационного и отсчетного крестов в поле зрения окуляра зрительной трубы). Затем поворачивают столик так, чтобы к трубе была обращена вторая преломляющая грань призмы, и, действуя другим установочным винтом, устанавливают эту грань перпендикулярно оптической оси трубы. После этого снова поворачивают призму первой гранью к трубе и проверяют установку. Если установка нарушилась, восстанавливают ее, повторив все операции сначала.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Определение преломляющего угла призмы

1. Для освещения входной щели коллиматора используется светодиодный фонарик и набор интерференционных светофильтров.

Схема экспериментальной установки приведена на рис.5.

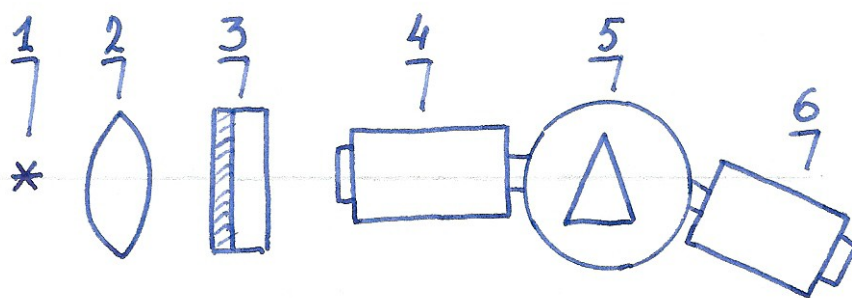


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: 1 – источник света (светодиодный фонарик); 2 – конденсор; 3 – интерференционный светофильтр; 4 – коллиматор гониометра; 5 – столик с исследуемой призмой; 6 – зрительная труба гониометра

2. Установите между конденсором и щелью коллиматора зеленый светофильтр ($\lambda = 550$ нм).

3. На закрепленный столик установите призму преломляющим ребром по направлению к щели коллиматора так, чтобы отраженные лучи N_1 и N_2 составляли с рабочими гранями призмы AB и BC примерно равные углы α и β (рис. 6).

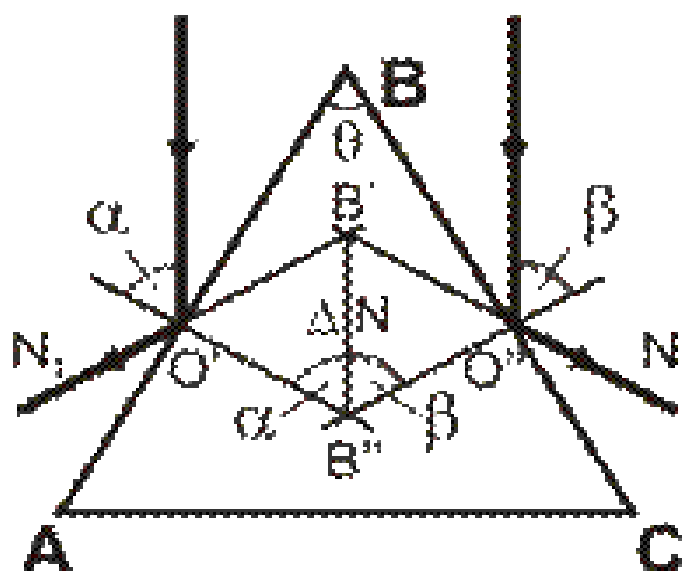


Рис. 6. Связь преломляющего угла призмы с направлениями лучей, отраженных от боковых граней призмы

4. Поверните оптическую трубу вправо так, чтобы увидеть в ней изображение щели коллиматора, получающееся при отражении луча N_2 от грани ВС. Закрепите оптическую трубу. С помощью микрометрического винта совместите это изображение с вертикальной составляющей креста, произведите отсчет.

5. Поверните трубу влево и найдите такое ее положение, когда в поле зрения попадет луч N_1 , отраженный от другой грани призмы АВ. Сделайте новый отсчет. Повторите измерения углов не менее трех раз.

Разность отсчетов углов ΔN для двух положений трубы (если углы, отсчитанные при повороте зрительной трубы влево и вправо, брать с разными знаками) равна удвоенному значению преломляющего угла призмы θ .

Действительно, из четырехугольника $O'B'O''B''$ имеем $2\alpha + 2\beta + \Delta N = 360^\circ$, из четырехугольника $O'BO''B''$ — $\alpha + \beta + \theta + 180^\circ = 360^\circ$.

Вычитая из первого равенства второе, умноженное на два, получим:

$$\theta = \Delta N / 2 . \quad (7)$$

6. Вычислите значение преломляющего угла призмы по формуле (7).

Задание 2. Определение показателя преломления призмы

Показатель преломления призмы удобно определять по углу наименьшего отклонения. Минимальное отклонение лучей получается при симметричном ходе лучей в призме (луч идет параллельно ее основанию), а угол минимального отклонения лучей $\alpha_{\min}$ и преломляющий угол θ связаны соотношением (6).

1. Снимите призму со столика и поверните трубу так, чтобы видеть щель коллиматора, наведите на неё крест окуляра трубы, произведите отсчет направления неотклоненного луча.

2. Расположите призму на столике так, чтобы биссектриса преломляющего угла образовывала с осью коллиматора острый угол, близкий к прямому. Пусть при этом основание призмы обращено вправо от наблюдателя.

3. Поверните трубу вправо (призма преломляет лучи к основанию) так, чтобы в поле зрения окуляра появилось изображение щели коллиматора. Вращайте столик вправо и наблюдайте за изображением щели, освещенной зеленой линией ртутной лампы. Пройдя некоторое расстояние в поле зрения окуляра, линия остановится, затем начнет возвращаться назад, при неизменном направлении вращения столика с призмой.

Закрепите зрительную трубу в положении смены линией направления своего движения. Используя винт микрометрической наводки, добейтесь, чтобы при вращении столика с призмой крест окуляра определял крайнее положение линии.

Найденное положение оптической трубы соответствует установке на *угол наименьшего отклонения* для зеленой линии ртути. Произведите отсчет угла.

Разность отсчетов двух положений трубы (при установке на угол наименьшего отклонения и начальной установке) даст значение угла наименьшего отклонения зеленой линии ртути при прохождении через призму.

4. Повторите предыдущие измерения, расположив призму в симметричное положение – основание призмы обращено влево. Найдите среднее значение угла наименьшего отклонения для двух положений призмы.

5. Расчитайте по формуле (6) значение показателей преломления призмы $n(n_0 = 1)$ для длины волны, соответствующей зеленой линии.

Задание 3. Определение дисперсии призмы

Измерив n для ряда спектральных линий, можно построить дисперсионную кривую – график зависимости $n(\lambda)$.

1. Повторите пункты 3 и 5 задания 2 для длин волн, соответствующим другим интерференционным фильтрам.

2. Постройте график $n(\lambda)$, откладывая по оси абсцисс длину волны, а по оси ординат - показатель преломления. По наклону графика определите дисперсию материала $dn/d\lambda$, из которого изготовлена призма.

Контрольные вопросы

1. Что называется показателем преломления света?
2. Как выводится соотношение (1)?
3. Как идет луч света в призме, если угол его отклонения от первоначального направления минимален?
4. Выведите формулу (6).
5. В чем состоит явление дисперсии? Чем отличается нормальная дисперсия от аномальной?
6. Для чего предназначается гониометр Г5, из каких основных частей состоит?
7. Как производится отсчет углов в гониометре Г5?
8. Как с помощью гониометра Г5 определить преломляющий угол призмы?
9. Как в данной работе определяется угол наименьшего отклонения призмы?
10. Как можно измерить дисперсию материала призмы?

