



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

## **ПРАКТИКУМ**

*Методические указания к  
лабораторным работам 1ФМ, 2ФМ,  
3ФМ*

**«ФОТОМЕТРИЯ»**

Авторы

Бажин И.В.,

Ершов И.В.,

Жданова Т.П.,

Кудря А.П.,

Лемешко Г.Ф.

Ростов-на-Дону, 2022

## Аннотация

Указания содержат краткое изложение устройства гониометров ЛКО-6 и Г-5 и методики измерения угловых координат с их помощью. Рассмотрены методики измерения основных светотехнических характеристик прозрачных призм и дифракционных решеток, а также применение их в спектральном анализе.

Методические указания предназначены для организации самостоятельной работы студентов специальности «Светотехника и источники света» при подготовке и проведении учебного лабораторного эксперимента.

## Авторы

**Бажин И.В.** - к.ф.-м.н., доцент  
кафедры «Физика»

**Ершов И.В.** - к.ф.-м.н., доцент  
кафедры «Физика»

**Жданова Т.П.** - к.ф.-м.н., доцент  
кафедры «Физика»

**Кудря А.П.** - старший преподаватель  
кафедры «Физика»

**Лемешко Г.Ф.** - к.ф.-м.н., доцент  
кафедры «Физика»

## Оглавление

Введение.....	4
Лабораторная работа № 1ФМ. Свойства стеклянной призмы.....	12
Выполнение работы.....	16
Контрольные вопросы.....	18
Литературы.....	18
Лабораторная работа № 2ФМ. Спектральные характеристики дисперсионных призм .....	18
Выполнение работы.....	21
Контрольные вопросы.....	23
Литературы.....	23
Лабораторная работа № 3ФМ. Спектральные характеристики дифракционных решеток .....	24
Выполнение работы.....	26
Контрольные вопросы.....	29
Литературы.....	29
Приложение.....	30

## Введение

Гониометр — оптический прибор, используемый для измерения угловых координат, показателя преломления и дисперсии прозрачных твердых тел, для исследования качества оптических систем и др.. В лабораторном практикуме по разделу «Фотометрия» используются два типа гониометров.

### Устройство и принцип работы гониометра ЛКО-6

Внешний вид гониометра ЛКО-6 представлен на рис. 1, на котором монтируются изучаемые объекты и некоторые источники излучения.

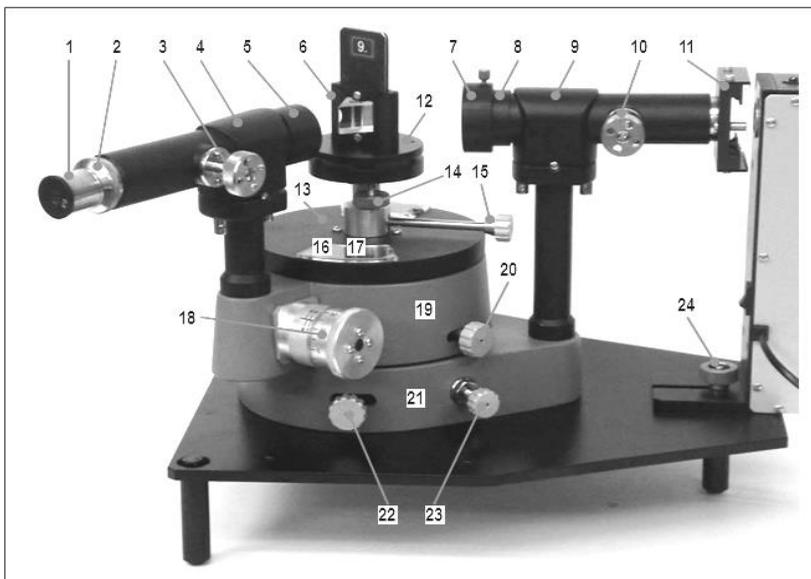


Рис.1.

На станине 21 гониометра установлена неподвижная труба-коллиматор 9 с объективом 8 (диаметр 30 мм, фокусное расстояние 168 мм) и держателем объектов 11. Держатель перемещается относительно объектива винтом 10 (ход 40 мм).

На закрепленной в станине вертикальной оси установлена каретка 19 и поворотный стол 13. Винт 22 фиксирует стол относительно станины. При затянутом винте 23 винт 22 осуществляет плавный поворот стола 13 вокруг вертикальной оси.

Со столом связан нониус 16, с кареткой – основная шкала 17 (см. рис.1 и 2,а).

На столе установлен предметный столик 12 с держателем объектов 6. При отпущенном винте 15 столик свободно вращается вокруг вертикальной оси, а при затянутом винте 15 столик зафиксирован относительно стола 13. Два винта 14 регулируют наклон столика и, соответственно, установленного на нем объекта.

Винт 20 фиксирует каретку относительно станины. При затянутом винте 20 барабан 18 осуществляет плавный поворот каретки 19 вокруг вертикальной оси. Один оборот барабана дает поворот каретки со зрительной трубой на один градус. На каретке установлена зрительная труба 4 с объективом 5 (диаметр 30 мм, фокусное расстояние 168 мм) и окуляром 1.

В оправе 2 окуляра установлен визирный крест. Окуляр перемещается относительно объектива винтом 3 (ход 40 мм). На объектив коллиматора или зрительной трубы можно установить насадку 7. Винт 24 предназначен для закрепления фонарей.

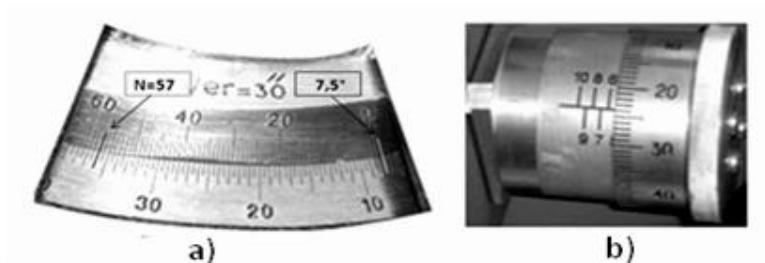


Рис. 2.

В данном гониометре имеется три отсчетных устройства:

1. Основная шкала с ценой деления 0,5 градуса (рис.2,а).
2. Нониус с ценой деления 0,5 угловой минуты (рис.2а).
3. Барабан с ценой деления 1 градус по кронштейну и 0,01 градуса по барабану (рис.2,б).

### Методы отсчета углов

**Метод 1.** Отсчет по основной шкале и нониусу с разрешением 0,5 угловых минут.

Измеряется угловая координата трубы относительно нулевого деления нониуса.

Нониус должен быть зафиксирован винтом фиксации стола

(поз.23 на рис.1).

Барабан (поз. 18 на рис.1) используется только для плавного перемещения трубы.

1. Установите визир зрительной трубы на нужный участок изображения (например, на изображение спектральной линии).

2. Сделайте отсчет положения нулевого деления нониуса по основной шкале. Отсчет округлите в меньшую сторону до ближайшего деления основной шкалы с разрешением 0,5 градуса (30 минут). Для удобства отсчета используйте лупу и лампу местного освещения.

3. Найдите риску нониуса, совпадающую с одним из делений основной шкалы. Определите номер  $N$  этой риски (от 0 до 60).

3. К отсчету по основной шкале (пункт 2) прибавьте  $N/2$  угловых минут.

На рис.2 отсчет по п.2 равен 7,5 градуса,  $N=57$ , отсчет угла 7 градусов и 58,5 минут.

Погрешность измерений ( $3\sigma$ ) составляет  $\pm 3$  риски (примерно 1,5 угловых минут)

**Метод 2.** *Отсчет по шкалам кронштейна и барабана с разрешением 0,01 градуса.*

Измеряется угловая координата трубы относительно ее «начального» положения, соответствующего нулевому отсчету по шкалам кронштейна и барабана.

1. Установите начальное положение барабана так, чтобы при его вращении зрительная труба прошла через исследуемый диапазон углов (на выбор вправо или влево).

2. Установите начальное положение трубы и затяните верхний винт фиксации.

3. Вращая барабан, установите визир на нужный участок изображения и снимите отсчет: целые значения градусов по шкале кронштейна плюс сотые доли градуса по шкале барабана.

***Для устранения влияния люфта подводите визир к спектральной линии всякий раз с одной и той же стороны.***

На рис. 2, в отсчет по шкале кронштейна равен 5 градусов, отсчет по барабану равен 0,24 градуса, отсчет угла 5,24 градуса.

Погрешность измерений ( $3\sigma$ ) составляет  $\pm 1$  деление (примерно 0,6 угловых минут)

**Метод 3.** *Дифференциальные измерения с разрешением 0,005 градуса*

Метод применяется для измерения расстояний между близкими спектральными линиями, например, при определении дисперсии спектрального прибора.

1. Определите координаты спектральных линий по методу 1 или по методу 2.

2. Если определяемые *расстояния* между спектральными линиями менее 5 градусов, то измерьте еще раз угловые координаты этих линий по шкалам кронштейна и барабана с разрешением 0,001 градуса, отсчитывая десятые доли деления барабана «на глаз». Измеренное расстояние между близкими линиями, равное разности отсчетов для этих линий, будет иметь погрешность ( $3\sigma$ ) в пределах  $\pm 0,005$  градуса (примерно 0,3 угловой минуты). На рис. 2 отсчет по барабану равен примерно 0,238 градуса, отсчет угла 5,238 градуса.

### Подготовка гониометра к измерениям

1. Установите в держателе объектов (11 на рис.1) коллиматора щель.

2. Установите и включите излучатель (светодиод), направив излучение в коллиматор.

3. Установите зрительную трубу напротив коллиматора.

4. Передвигая окуляр в оправе вдоль оси зрительной трубы, получите в окуляре четкое изображение визирного креста.

5. Перемещая держатель объекта (винт 10 на рис.1) и оправу с окуляром (винт 3 на рис.1), получите четкое изображение объекта.

### Устройство и принцип работы гониометра Г-5

Внешний вид гониометра с двух сторон приведен на рис. 3,а и 3,б.

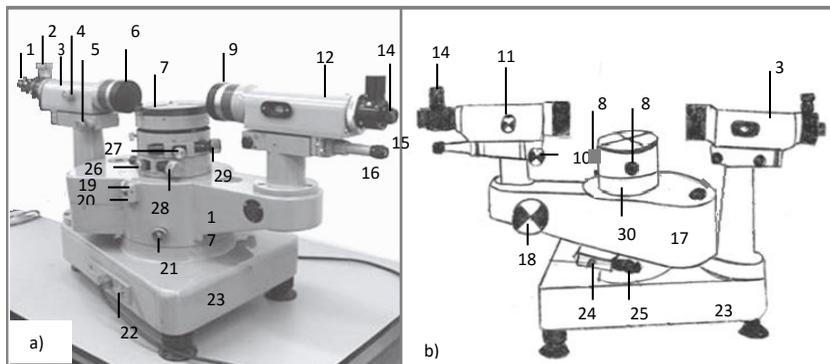


Рис. 3

Гониометр Г-5 состоит из следующих основных частей: коллиматора 3, столика 7, алидады 17 со зрительной трубой 12, которые крепятся на массивном основании 23. На столике 7 размещаются исследуемые предметы. Наклон столика относительно вертикальной оси регулируется винтами 8.

Коллиматор служит для получения параллельного пучка лучей. Он состоит из объектива 6, в фокальной плоскости которого находится щель 1, ширина которой (от 0 до 2 мм) регулируется микрометрическим винтом 2. Коллиматор крепится неподвижно на основании гониометра 23. Настройка коллиматора на параллельность пучка производится винтом 4.

Зрительная труба состоит из объектива 9 и окуляра 14. Объективы коллиматора и зрительной трубы одинаковы. Фокусировка зрительной трубы производится винтом 11. Наклон коллиматора и зрительной трубы к горизонтальной оси изменяется винтами 5 и 10 соответственно.

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

Алидада 17 вращается относительно лимба 30 и столика 7 либо грубо, от руки, либо (при зажатом винте 24) точно, с помощью

микрометрического винта 25 (см. рис. 3).

1. 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.

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

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

4. 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).

Схема окуляра зрительной трубы приведена на рис. 4, а.

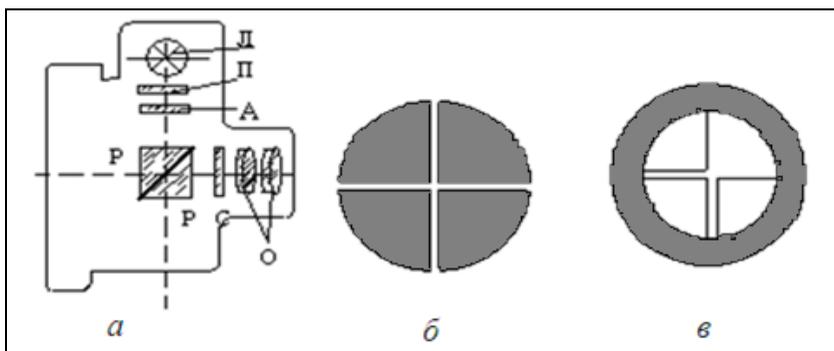


Рис. 4

Свет от лампы Л проходит защитную стеклянную пластинку П и попадает на автоколлимационную сетку А, содержащую две взаимно перпендикулярные щели (рис. 4, б). Пройдя через сетку, свет попадает на две прямоугольные призмы Р, на гипотенузные грани которых нанесен полупрозрачный слой с коэффициентом отражения 50%. Светящийся крест можно увидеть невооруженным глазом, если заглянуть в зрительную трубу 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. 4, в). Совмещение изображений обоих крестов рассматривается через окулярные линзы  $O$ . Резкость видимого изображения отсчетного креста регулируется вращением оправы окуляра 14 (см. рис. 3).

### Измерение углов

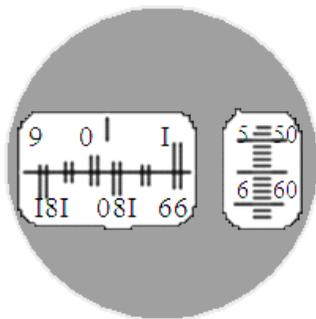


Рис.5

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  $1^\circ$ . Шкалу лимба можно наблюдать через окуляр отсчетного устройства 16 при включенном освещении. Резкость изображения шкалы регулируется вращением оправы окуляра 15. Оптическая система отсчетного устройства собрана так, что через окуляр можно наблюдать изображение штрихов двух диаметрально противоположных участков лимба, причем одно изображение прямое, а другое – обратное (рис. 5). Кроме того, оптическая система позволяет перемещать эти изображения друг относительно друга, оставляя в покое как лимб, так и алидаду со зрительной трубой. 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 микрометра приведено на рис. 5. В левом окне наблюдается изображение 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 изображения верхних и нижних штрихов лимба в левом окне окуляра отсчетного микроскопа. Эта операция проводится вращением маховичка оптического микроскопа 18 (см. рис. 3). Число градусов равно

видимой ближайшей левой от вертикального индекса цифре (см. рис. 5). Число десятков минут равно числу интервалов, заключенных между верхним штрихом, который соответствует числу отсчитанных градусов, и нижним оцифрованным штрихом, отличающимся от верхнего на  $180^\circ$ . 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. 5, соответствует отсчету  $0^\circ 15' 55''$ . Устройство отсчета гониометра Г-5 обеспечивает точность измерения угла до  $5''$ .

### Юстировка гониометра

Гониометр требует тщательной *юстировки*, которая заключается: 1) в установке зрительной трубы на  $\infty$ ; 2) в установке оптической оси трубы перпендикулярно оси вращения прибора; 3) в установке коллиматора на параллельный пучок лучей.

1. *Установка трубы на бесконечность.* Для установки трубы на бесконечность нужно установить отсчетный крест (см. рис. 4, в) в общей плоскости объектива и окуляра. Установка креста в фокальной плоскости окуляра производится вращением оправы 14 (см. рис. 3). 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. Вращая винт 11, необходимо добиться максимальной резкости этого изображения. Обе сетки окуляра, А и С (рис. 4, а), расположены на строго одинаковых расстояниях от гипотенузных граней призм Р, поэтому их одновременное наблюдение в окуляре возможно только в случае, когда фокальные плоскости объектива и окуляра совпадают (труба настроена на  $\infty$ ).

2. *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 к 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,

который следует совместить с отсчетным крестом окуляра. Затем поворачивают зрительную трубу на  $180^\circ$  при неподвижном столике (можно поворачивать не зрительную трубу, а столик 7 при неподвижной трубе). 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  $180^\circ$ , и если установка нарушена, ее снова восстанавливают тем же путем. Легко видеть, что расположение светящегося креста не изменяется при повороте алидады на  $180^\circ$  лишь в том случае, если оптическая ось зрительной трубы перпендикулярна оси вращения прибора. На этом регулировка зрительной трубы заканчивается.

3. *Установка коллиматора.* Щель коллиматора должна быть установлена в фокальной плоскости объектива, с тем 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 трубку 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.

## **Лабораторная работа № 1 ФМ**

### **СВОЙСТВА СТЕКЛЯННОЙ ПРИЗМЫ**

#### Цель работы.

1. Познакомиться со сферой применения призм в светотехнике.
2. Познакомиться с методом определения преломляющего угла призмы, угла наименьшего отклонения, показателя преломления призмы и предельного угла полного отражения.
3. Познакомиться с устройством гониометра и методами измерения угловых координат.

#### Оборудование.

Гониометр ЛКО-6 или Г-5, стеклянная призма, светодиод, источник питания.

#### **Краткая теория**

В светотехнике оптические призмы и их комбинации

получили широкое распространение. В зависимости от их оптической конструкции они функционально позволяют: изменять ход лучей в оптических приборах; изменять направление оптической оси системы; оборачивать оптические изображения; уменьшать габариты оптических систем; разделять пучки лучей в оптических системах; объединять поля в оптических системах; вращать в оптических системах изображения; рассеивать излучение, исходящее от любых источников; разлагать видимое излучение в спектр и др. В отражательных призмах (рис.1,а), оборачивающих изображение (рис.1,б) и др. используется явление *полного отражения*.

Действие одной призмы, часто заменяет действие системы зеркал. Потери света у призм от граней с полным отражением равны нулю, тогда как при отражении от поверхностей зеркал потери довольно велики. Число рабочих граней и взаимное их расположение определяет ход пучка внутри призмы и все преобразования пучка, которые при этом происходят. Свойство стеклянных призм широко используется при изготовлении стекол для различных светильников. Так, например, акриловое стекло с рифленной поверхностью «призма» обеспечивает качественное рассеивание света любых источников и позволяет получить равномерную освещенность на поверхности.

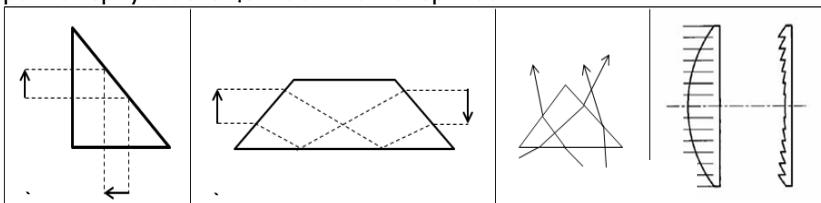


Рис.1.

На рис.1,с показан элемент призматического стекла, используемого в качестве рассеивателя в светильниках. В светотехнике часто применяется линза Френеля, обладающая важными свойствами обычной линзы – формировать в пространстве параллельный световой поток (рис. 1,d), но имеет ряд преимуществ - она

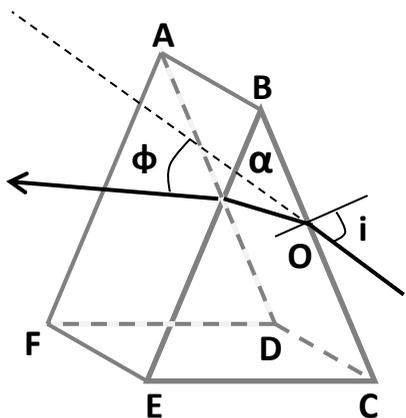


Рис. 2.

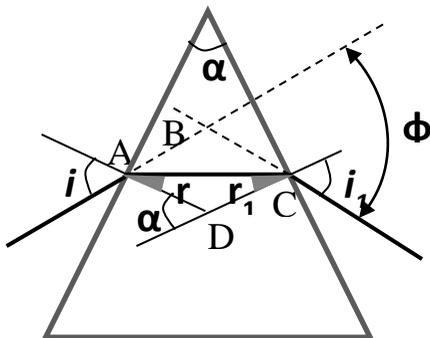
легкая, тонкая и плоская. Линза Френеля состоит из концентрических канавок треугольного профиля. Шаг канавок сопоставим с высотой их профиля. Таким образом, получается, что каждая канавка является как бы частью обычной линзы, а в сечении воспринимается как набор призм. Широко используется в маяках, а в последнее время устанавливается в некоторых типах светодиодов. Замечательные свойства призм – разлагать свет в спектр, формировать изображения или световые потоки и перемещать их в любом направлении, благодаря полному отражению, с большим успехом используют конструкторы оптических приборов и светодизайнеры.

Основные свойства призмы и ее характеристики рассмотрим на простейшей спектральной призме, форма которой показана на рис. 2. Для видимой области основным материалом для изготовления спектральных призм служит стекло. Спектральные призмы делают из легких и тяжелых стекол типа крон и флинт.

Двугранный угол  $\alpha$  с ребром АВ называется *преломляющим*. Плоскости ABCD и ABEF называются *преломляющими гранями* призмы, а плоскость DCEF – *основанием призмы*. Плоскость, перпендикулярная ребру призмы и проходящая через его середину, называется *плоскостью главного сечения*.

Если направить луч монохроматического света на преломляющую плоскость ABCD, то луч, пройдя призму, отклонится от первоначального направления на угол  $\varphi$  (рис. 2). Поворачивая призму вокруг оси, проходящую через точку О и параллельную ребру АВ, то есть изменяя угол падения  $i$ , угол отклонения  $\varphi$  спектральной линии будет также изменяться и примет минимальное значение когда луч в призме будет параллелен основанию. Следовательно, наблюдая за угловым перемещением спектральной линии, при повороте призмы, можно определить угол наименьшего отклонения.

Предположим, что мы установили призму с показателем преломления  $n$  и преломляющим углом  $\alpha$  под углом наименьшего отклонения для луча монохроматического света. Пусть луч падает на левую грань призмы под углом  $i$  (рис.3). Пройдя призму, луч преломится на правой грани и выйдет из призмы под углом  $i_1$ ,



отклонившись от первоначального направления на угол  $\varphi$ . Для **минимального угла отклонения**, с учетом свойств обратимости световых лучей, абсолютный показатель преломления призмы равен:

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin i_1}{\sin r_1}, \quad (1)$$

где  $r$  – угол преломления луча.

Для равнобедренных и равносторонних призм при угле наименьшего отклонения, т.е. когда луч AC параллелен основанию, углы  $r$  и  $r_1$  равны, а из формулы (1) следует, что  $i = i_1$ .

В треугольнике ACD внешним является преломляющий угол призмы  $\alpha$ , который равен сумме несмежных углов

$$\alpha = r + r_1 = 2r,$$

поэтому

$$r = r_1 = \alpha / 2. \quad (2)$$

Угол наименьшего отклонения  $\varphi$  является внешним в треугольнике ABC, следовательно

$$\varphi = (i - r) + (i_1 - r_1) = 2(i - r),$$

а угол падения

$$i = \varphi / 2 + r = \varphi / 2 + \alpha / 2. \quad (3)$$

Сделав подстановку (2) и (3) в формулу (1), получим зависимость показателя преломления вещества призмы от ее преломляющего угла и угла наименьшего отклонения

$$n = \frac{\sin((\varphi + \alpha) / 2)}{\sin(\alpha / 2)}. \quad (4)$$

По показателю преломления призмы можно определить предельный угол полного отражения

$$i_{\text{пред}} = \arcsin(1/n). \quad (5)$$

Полное отражение наступает на границе двух сред с разными показателями преломления, при угле падения в более плотной среде, равному или больше предельного  $i_{\text{пред}}$ .

Полное отражение можно использовать для определения преломляющего угла  $\alpha$  равнобедренной или равносторонней призмы (рис. 4) в том случае, когда параллельный пучок света входит в призму через ее основание D. Если угол падения луча  $i$  на внутреннюю преломляющую

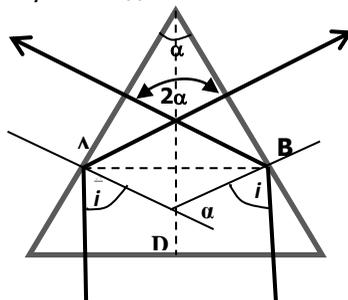


Рис. 4

поверхность равен или больше предельного угла полного отражения, то отраженные лучи будут выходить по нормали к боковым поверхностям под углом  $2\alpha$ .

Измерив угловое расстояние между вышедшими лучами из призмы, найдем преломляющий угол призмы. Кроме того, преломляющий угол призмы можно определить по угловому расстоянию  $2\alpha$  между отраженными лучами от внешних преломляющих поверхностей в случае падения параллельных лучей на ребро призмы.

Полное отражение составляет основу волоконной оптики, которая широко используется в оптоэлектронном приборостроении, оптоволоконной связи, в медицине, светотехнике и др. отраслях. В природе полным отражением объясняется верхний и нижний миражи, серебристый цвет капелек утренней росы и другие явления.

### Выполнение работы

#### *Задание 1.*

#### **Знакомство с устройством гониометра и подготовка его к измерениям**

1. Познакомьтесь с устройством гониометра и назначением каждого его узла (см. рис. 1 или 3 введения).
2. Установите и включите излучатель (светодиод), направив излучение в коллиматор.
3. С помощью микрометрического винта установите оптимальную ширину щели коллиматора.
4. Установите зрительную трубу напротив коллиматора.
5. Передвигая окуляр в оправе вдоль оси зрительной трубы, получите в окуляре четкое изображение визирного креста.
6. В поле зрения окуляра получите четкое изображение щели. Фокусировка зрительной трубы производится винтом 3 на рис. 1 или винтом 11 на рис. 3, б введения.
7. Установите визирный крест на середину изображения щели и произведите измерение угловой координаты  $\varphi_0$  прямого луча по отсчетному устройству.
8. Измерения положения прямого луча повторите 3-5 раз и определите его среднее значение. Результаты занесите в табл. 2.

#### *Задание 2.*

#### **Определение преломляющего угла призмы**

1. Установите на предметный столик призму так, чтобы основание призмы (рис. 2) было примерно перпендикулярно лучу (рис. 4). При этом световой поток луча будет разделен на

две части, которые отразятся от внутренних поверхностей преломляющих граней ABCD и ABEF под углом  $2\alpha$ .

2. Измерить угол между отраженными от граней лучами.

3. Повторить пункты 1, 2 от трех до пяти раз. Результаты измерений занесите в табл. 1.

Таблица 1.

№	$2\alpha$	$\alpha$	$\Delta\alpha$	$\epsilon$	$\alpha = \langle\alpha\rangle \pm \Delta\alpha$
п/п	град	град	град	%	град
1					
2					
3					
:					
Ср.					

4. Вычислите: для каждого измерения преломляющий угол призмы  $\alpha$ ; среднее значение  $\langle\alpha\rangle$ ; абсолютную погрешность отдельного измерения  $\Delta\alpha$ ; среднее значение  $\langle\Delta\alpha\rangle$  и относительную погрешность.

### Задание 3.

#### Определение угла наименьшего отклонения для спектральной линии светодиода.

1. Установите призму так, чтобы луч падал на ее грань под углом  $\approx 45^\circ$  (рис. 5).

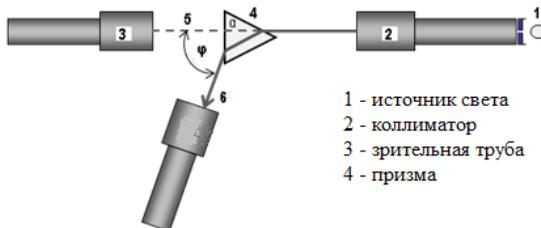


Рис. 5

2. Поворачивайте зрительную трубу 3 в направлении основания призмы до тех пор, пока в поле зрения окуляра не появятся изображение спектральной линии (рис. 5).

3. Поворачивайте предметный столик с призмой в таком направлении, чтобы изображение линии смещалось в сторону неотклоненного луча (5 на рис.5). Поворот продолжайте до тех пор, пока изображение линии не остановится и при дальнейшем вращении столика в ту же сторону не начнет двигаться назад. Момент остановки изображения линии соответствует **углу наименьшего отклонения** (6 на рис.5).

4. Наведя визирный крест зрительной трубы на изображение линии, измерьте угловую координату  $\varphi$ .

5. Повторите пункты 2-4 от трех до пяти раз. Для каждого измерения вычислить по формуле  $\varphi = \varphi_i - \varphi_0$  угол наименьшего отклонения.

6. По среднему значению  $\varphi$ , вычислите по формуле (4) показатель преломления призмы для светодиодного излучения, а по формуле (5) - предельный угол полного отражения.

7. Результаты измерений занесите в табл. 2.

Таблица 2

№	Отсчет $\varphi_0$	Отсчет $\varphi_i$	Угол откл. $\varphi$	Показ. прел. n	Пред. угол $i_{\text{пред}}$
п/п	град	град	град		град
1					
2					
3					
:					
Ср.					

8. Определите наибольший угол падения на боковую грань призмы, при котором наступает полное отражение на основании призмы.

9. По выполненному заданию сделать вывод.

### Контрольные вопросы

1. Где применяются оптические призмы в светотехнике?
2. Как устроена простейшая стеклянная призма? Перечислите ее основные характеристики.
3. Как определяют угол наименьшего отклонения для спектра?
4. Как зависит показатель преломления призмы от угла наименьшего отклонения?
5. Как определить предельный угол полного отражения?
6. Как можно определить преломляющий угол призмы?
7. Из каких основных узлов состоит гониометр?
8. Как с помощью гониометра измеряют угловые перемещения?

### Литература

1. Справочная книга по светотехнике /Под ред. Ю.Б. Айзенберга. – М: Знак. 2006.
2. Основы светотехники. В.В. Мешков. – М: Энергия. 1979.
3. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Оптика. – Наука, 1980, гл.IV, с. 292-298
4. М.М. Гуревич Фотометрия. – Л: Энергоатомиздат, 1983. с.191, 192.

## Лабораторная работа № 2 ФМ

### СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРСИОННЫХ ПРИЗМ

#### Цель работы.

1. По спектру излучения ртути или неона построить зависимость  $n=f(\lambda)$ .
2. Определить дисперсию показателя преломления призмы и угловую дисперсию призмы.

Оборудование. Гониометр, стеклянная призма, ртутный фонарь или неоновая лампа.

#### Краткая теория

В спектральном анализе используют разнообразные дисперсионные (спектральные) призмы, которые широко используются в светотехнике. Рассмотрим наиболее важные спектральные характеристики этих оптических приборов.

Свет любого излучения *прозрачной призмой* разлагается в спектр, который называется *дисперсионным* или *призматическим*. Основным материалом для изготовления *спектральных призм* для видимой области служит тяжелое стекло типа флинт, обладающих большой дисперсией. Основные свойства призмы и ее характеристики рассмотрим на простейшей спектральной призме, форма которой показана на рис.1. Двугранный угол  $\alpha$  с ребром  $AB$  называется **преломляющим**.

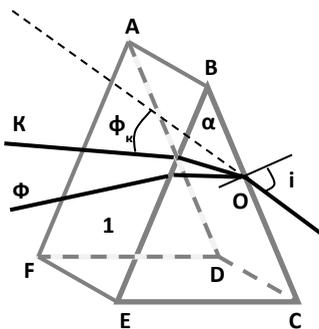


Рис.1.

Плоскости  $ABCD$  и  $ABEF$  называются преломляющими гранями призмы, а плоскость  $DCEF$  – основанием призмы. Плоскость, перпендикулярная ребру призмы и проходящая через его середину, называется плоскостью главного

сечения. Луч белого света призма разлагает в спектр, так как показатель преломления  $n$  вещества зависит от длины волн  $\lambda$  (частоты  $\nu$ ) света. Это явление называется **дисперсией света**. Первые работы по дисперсии света выполнил в 1672 г. И. Ньютон, он же впервые установил спектральный состав белого света, условно разделив его на семь цветов - красный, оранжевый, желтый,

зеленый, голубой, синий и фиолетовый. На рис.1 показаны граничные лучи спектра белого света – красного с длиной волны 760 нм и фиолетового с длиной волны 380 нм. Для красных лучей показатель преломления призмы меньше, чем для фиолетовых, и **угол отклонения  $\varphi_k$**  меньше. Если призму поворачивать вокруг оси, проходящей через точку O и параллельной ребру АВ, то есть изменять угол падения  $i$ , то и угол отклонения  $\varphi$  спектральной линии (спектра) будет изменяться и примет минимальное значение когда луч в призме будет параллелен основанию. Следовательно, наблюдая за угловым перемещением спектральной линии (спектра), при повороте призмы, можно определить угол наименьшего отклонения  $\varphi$  (см. пункты 2 – 4 задания 2).

Показатель преломления  $n$  вещества призмы зависит от ее преломляющего угла  $\alpha$  и угла наименьшего отклонения  $\varphi$  (вывод приведен на стр. 15-16):

$$n = \frac{\sin((\varphi + \alpha)/2)}{\sin(\alpha/2)}. \quad (1)$$

Разложение света в спектр в призме происходит по значениям показателя преломления. Для **нормальной дисперсии** с увеличением длины волны показатель преломления уменьшается, т.е.  $dn/d\lambda < 0$ . Для красных лучей с  $\lambda = 760 \text{ нм}$

показатель преломления минимальный, а для фиолетовых с  $\lambda = 380 \text{ нм}$  - максимальный. Сущностью явления дисперсии света является неодинаковая скорость распространения лучей света с различной длиной волны в прозрачном веществе. Так как абсолютный показатель преломления показывает во сколько раз скорость света в вакууме больше чем в среде ( $n = c/u$ ), поэтому скорость красных лучей в призме больше чем фиолетовых. Нормальную дисперсию света можно представить в виде зависимости  $n = f(\lambda)$ . (рис. 2).

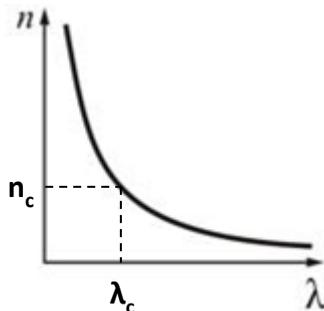


Рис.2.

Одной из важнейших характеристик призмы является **угловая дисперсия D**, численно равная угловому расстоянию  $d\varphi$  между соседними спектральными линиями  $d\lambda$ :

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda}. \quad (2)$$

Так как угол наименьшего отклонения зависит от показателя преломления вещества призмы, то угловую дисперсию можно

представить в виде:

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{d\varphi}{dn} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (3)$$

Величина  $dn/d\lambda$  называется **дисперсией материала** (дисперсия показателя преломления), которая с показателем преломления веществ  $n(\lambda)$  характеризуют основные оптические свойства материала, из которого изготовлена призма. Дифференцируя формулу (1), мы можем найти первый сомножитель уравнения (3). Действительно:

$$dn/d\varphi = \cos(\alpha/2 + \varphi/2) / (2 \cdot \sin(\alpha/2))$$

и поэтому

$$D = \frac{2 \cdot \sin(\alpha/2)}{\cos(\alpha/2 + \varphi/2)} \cdot \frac{dn}{d\lambda} = \frac{2 \cdot \sin(\alpha/2)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\alpha/2)}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (4)$$

Как видно из этой формулы, чтобы достичь максимального спектрального разрешения призмы, мы должны использовать материал с максимальным значением показателя преломления  $n$  и дисперсией материала ( $dn/d\lambda$ ).

Если преломляющий угол призмы равен  $60^\circ$ , то формула (4) упрощается

$$D = \frac{2}{\sqrt{4 - n^2}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует, что для призмы с преломляющим углом  $60^\circ$  дисперсия материала (дисперсия показателя преломления) равна

$$\frac{dn}{d\lambda} = \frac{\sqrt{4 - n^2}}{2} \cdot D. \quad (6)$$

### Выполнение работы

#### Задание 1.

#### **Знакомство с устройством гониометра и его настройкой**

1. Познакомиться с устройством и настройкой гониометра (см. рис. 1 или 3 введения).
2. Перед щелью коллиматора (11 на рис.1 или 1 на рис.3 введения) установите ртутную или неоновую лампу.
3. Установите оптимальную ширину щели коллиматора.
4. Несколько раз (3-5) по отсчетному устройству определите

положение прямого луча –  $\varphi_0$  и определите его среднее значение. Результаты занесите в табл. 1.

*Задание 2.*

### Определение углов минимального отклонения для спектральных линий

1. Установите на предметный столик призму так, чтобы луч падал на ее грань под углом  $\approx 45^\circ$  (рис.3).

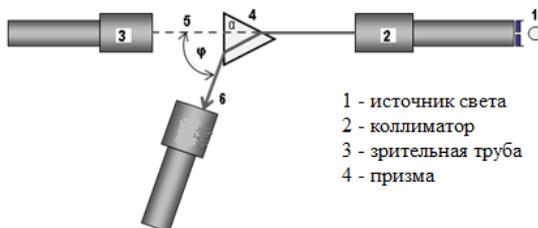


Рис. 3.

2. Поворачивайте зрительную трубу 3 в направлении основания призмы до тех пор, пока в поле зрения окуляра не появятся изображения спектральных линий б.

3. Сфокусируйте зрительную трубу на четкое изображение спектра излучения.

4. Поворачивайте предметный столик с призмой в таком направлении, чтобы изображение спектра смещалось в сторону неотклоненного луча (5 на рис. 3). Поворот продолжайте до тех пор, пока изображение спектра не остановится и при дальнейшем вращении столика в ту же сторону не начнет двигаться назад. Момент остановки изображения спектра соответствует **углу наименьшего отклонения** (6 на рис.3).

5. Занесите в табл. 1 цвета и длины волн спектральных линий исследуемого вещества (см. Приложение).

6. Последовательно наводя визирный крест зрительной трубы на каждую линию спектра, измерьте их угловые координаты  $\varphi_i$ . Результаты измерений занесите в табл. 1.

7. Для каждой линии спектра вычислите угол наименьшего отклонения:  $\varphi = \varphi_i - \varphi_0$ .

8. Для каждой спектральной линии вычислите по формуле (1) показатель преломления материала призмы. Результаты вычислений занесите в табл. 1.

Таблица 1

Цвет	Отн. яркость	Длина волны $\lambda$	$\varphi_0$	$\varphi_1$	Угол откл. $\varphi$	Показ. прел. $n$

9. Постройте график зависимости  $n=f(\lambda)$ .

*Задание 3.*

**Определение угловой дисперсии призмы и дисперсии показателя преломления**

1. Используя данные табл. 1 для каждой соседней пары спектральных линий вычислите по формуле  $D = \Delta\varphi / \Delta\lambda$  угловую дисперсию, а по формуле (6) – дисперсию показателя преломления.

2. Результаты вычислений занесите в табл. 2.

Таблица 2

Цвет	Дл. волны $\lambda$	Отсчет $\varphi$ , град	$D = \Delta\varphi / \Delta\lambda$ , град/нм	$\Delta n / \Delta\lambda$ , 1/нм

3. По выполненному заданию сделать вывод.

### Контрольные вопросы

1. Как устроена простейшая спектральная призма? Перечислите ее основные характеристики.
2. Что называется дисперсией света?
3. Как определяют угол наименьшего отклонения для спектра?
4. Как зависит показатель преломления призмы от угла наименьшего отклонения?
5. Что называется нормальной дисперсией и как получить зависимость  $n(\lambda)$ ?
6. Как по графику нормальной дисперсии  $n(\lambda)$  определить длину монохроматического света?
7. Что называется угловой дисперсией, дисперсией материала?
2. Из каких основных узлов состоит гониометр?
3. Как с помощью гониометра измеряют угловые перемещения?

### Литература

1. Справочная книга по светотехнике /Под ред. Ю.Б. Айзенберга, – М: Знак. 2006.
2. И.В. Савельев. Курс физики т.2. – М: Наука. 1989. §§102, 103
2. М.М. Гуревич Фотометрия. Л: – Энергоатомиздат, 1983. стр. 191, 192.
3. Н.М. Годжаев, Оптика. – Высш. школа, 1977.

### Лабораторная работа № 3 ФМ

#### СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК

##### Цель работы.

1. Определить период и угловую дисперсию дифракционной решетки.
2. По спектру излучения ртути или неона построить зависимость  $\varphi = f(\lambda)$ .

Оборудование. Гониометр, дифракционная решетка, ртутный фонарь или неоновая лампа.

##### Краткая теория

В спектральном анализе широко используют разнообразные дифракционные решетки. Рассмотрим наиболее важные спектральные характеристики этих оптических приборов. Дифракционная решётка – оптический прибор, действие

которого основано на использовании явления *дифракции света*.

1. Амплитудная дифракционная решетка представляет собой совокупность большого числа регулярно расположенных штрихов, нанесённых на прозрачную поверхность, или вырезаются в виде щелей на непрозрачном экране. Такие решетки называются амплитудными, а наблюдение дифракции света ведется в проходящем свете.

Расстояние, через которое повторяются штрихи на решётке, называют *периодом дифракционной решётки*  $d$ . Если известно число штрихов  $N$ , приходящихся на 1 мм решётки, то период решётки находят по формуле:  $d = 1/N$  мм.

Если свет падает по нормали на дифракционную решетку с периодом  $d$ , то условия интерференционных максимумов  $k$ -го порядка, для света с длиной волны  $\lambda$ , наблюдаемых под углами  $\varphi$ , имеют вид:

$$d \sin \varphi = k\lambda. \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что в спектре первого порядка, для которого  $\sin \varphi \approx \varphi$ , *дифракционный спектр линейный*.

Одной из важных характеристик дифракционной решётки является угловая дисперсия, определяемая угловым расстоянием  $d\varphi$  между соседними спектральными линиями  $d\lambda$ . Продифференцировав формулу (1), получим

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{d \cdot \cos \varphi}. \quad (2)$$

С угловой дисперсией связана разрешающая способность  $R$ , характеризующая способность решетки разделять (разрешать) спектральные линии, мало отличающиеся по длинам волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$

$$R = \frac{\langle \lambda \rangle}{(\lambda_2 - \lambda_1)} = \frac{(\lambda_2 + \lambda_1)}{2(\lambda_2 - \lambda_1)}. \quad (3)$$

На практике угловую дисперсию определяют следующим образом. На рисунке 1 представлен фрагмент спектра неона, полученный с помощью дифракционной решетки ДР. В спектре первого порядка линия с длиной волны  $\lambda_1$  наблюдается под углом  $\varphi_1$ , а линия с длиной волны  $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$  - под углом  $\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi$ . Угловая дисперсия решётки в этом случае будет равна

$$D = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}. \quad (4)$$

2. Фазовые

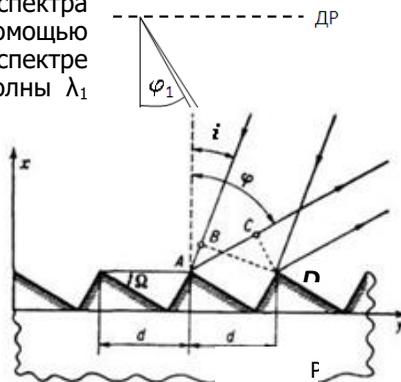


Рис.2.

дифракционные решетки могут быть отражающими и пропускающими. Отражающая дифракционная решетка - непрозрачная решетка, представляющая собой систему канавок определенного профиля, имеющих зеркальное покрытие. При отражении света от идеальной отражательной решетки возникает периодическое изменение фазы, вызванные тем, что, плоская волна BD (рис. 2) достигает отражающей поверхности не одновременно по всему фронту и, следовательно, в отраженной волне CD имеется периодическое изменение фазы, повторяющееся при переходе от одного отражающего выступа к следующему. Из рис.2 следует, что разность фаз

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(AC - AB) = \frac{2\pi}{\lambda}d(\sin\varphi - \sin i). \quad (5)$$

Схема опыта с отражательной решеткой приведена на рис.3.

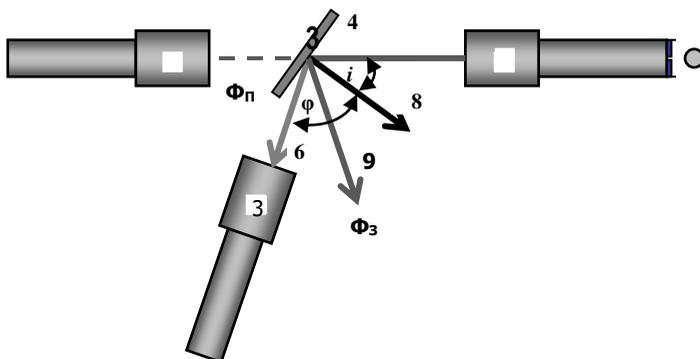


Рис. 3.

Излучение источника света 1 проходит через коллиматор 2 и отражается от решетки 4. С помощью зрительной трубы 3, настроенной на резкое изображение щели коллиматора, фиксируются следующие угловые координаты излучения:

$\Phi_n$  – «прямое» изображение щели в отсутствие решетки (белый свет, линия 5);  $\Phi_z$  – «зеркально» отраженный максимум 0-го порядка (белый свет, линия 9);  $\Phi_k$  – направление на спектральный максимум k-го порядка (набор линий 6).

Из уравнения (5) следует, что оптическая разность хода равна  $\Delta = d(\sin\varphi - \sin i)$ , поэтому направление на максимум k-го порядка для длины волны  $\lambda$  определяется условием

$$d(\sin\varphi - \sin i) = k\lambda, \quad (6)$$

где d - период решетки.

По измеренным угловым координатам  $\varphi_{\Pi}$ ,  $\varphi_3$  и  $\varphi_k$ , определяют угол падения  $i$  и направление на максимум  $k$ -го порядка по отношению к нормали  $\varphi$  (см. рис.3).

Из рис.3 следует, что:

$$i = 90^\circ - (\varphi_3 - \varphi_{\Pi}) / 2 ; \quad (7)$$

$$\varphi = i + (\varphi_3 - \varphi_k). \quad (8)$$

### Выполнение работы

#### Задание 1.

#### **Знакомство с устройством гониометра и его настройкой**

1. Познакомиться с устройством и настройкой гониометра (см. рис. 1 или 3 введения).
2. Перед щелью коллиматора (11 на рис.1 или 1 на рис.3 введения) установите ртутную или неоновую лампу.
3. Установите оптимальную ширину щели коллиматора.
4. Несколько раз (3-5) по отсчетному устройству определите положение прямого луча –  $\varphi_{\Pi}$  и определите его среднее значение. Результаты занесите в таблицы 1 и 2.

#### Задание 2.

#### **Определение периода, угловой дисперсии и разрешающей способности амплитудной дифракционной решетки**

1. Установите на предметный столик амплитудную решетку так, чтобы луч, вышедший из коллиматора, падал на решетку по нормали.
2. Сфокусируйте зрительную трубу на четкое изображение спектра излучения.
3. Занесите в табл. 1 цвета и длины волн спектральных линий исследуемого вещества (см. Приложение).
4. Последовательно наводя визирный крест на каждую линию спектра первого порядка, измерьте их угловые координаты  $\varphi_i$ . Результаты измерений занесите в табл. 1.
5. Для каждой линии спектра первого порядка  $k=1$  вычислите угол дифракции:  $\varphi = \varphi_i - \varphi_{\Pi}$ .
6. Для каждой спектральной линии вычислите по формуле (1) период дифракционной решетки.
7. Вычислить среднее значение периода решетки  $\langle d \rangle$  и среднюю абсолютную погрешность  $\langle \Delta d \rangle$ . Результат представить в



$\varphi_n = \dots$ 
 $\varphi_3 = \dots$ 
 $i = \dots$ 

Таблица 2

k	Цвет	$\lambda$ , нм	$\varphi_k$ , гр.	$\varphi$ , гр.	d, нм	$\Delta d$ , нм	D, гр/нм	D <sub>теор</sub> , гр/нм
1								
2								
Ср.								

10. Вычислить среднее значение периода решетки  $\langle d \rangle$  и среднюю абсолютную погрешность  $\langle \Delta d \rangle$ . Результат представить в виде:  $d = \langle d \rangle \pm \langle \Delta d \rangle$ .

11. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 2. По выполненному заданию сделайте вывод.

### Контрольные вопросы

1. Что называется дифракцией света? Как устроены амплитудная и фазовая дифракционные решетки?
2. Привести определения основных характеристик дифракционных решеток.
3. Как определяют период, угловую дисперсию и разрешающую способность дифракционной решетки?
4. Чем отличается дифракционный спектр от призматического?
5. Из каких основных узлов состоит гониометр?
6. Как с помощью гониометра измеряют угловые перемещения?

### Литература

1. Справочная книга по светотехнике /Под ред. Ю.Б. Айзенберга. – М: Знак. 2006.
2. И.В. Савельев. Курс физики т.2. – М: Наука. 1989. §§94, 95.

3. Г.С. Ландсберг Оптика. – Наука, 1976, гл.IX, §§46, 48, 50.  
 4. М.М. Гуревич. Фотометрия. – Л: Энергоатомиздат, 1983.  
 стр.191- 193.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Неон			Ртуть	
Цвет	Отн. яркость	Длина волны $\lambda$	Цвет	Длина волны $\lambda$
Голубая	5	482,73 нм	Фиолетовая	404,7 нм
Зеленая	5	533,08 нм	Фиолетовая	407,8 нм
Зеленая	8	540,05 нм	Синяя (яр)	435,8 нм
Желтая	10	585,25 нм	Зелен-голуб	491,6 нм
Красно-оранж.	4	607,43 нм	Зеленая (яр)	546,1 нм
Ярко-красная	8	626,65 нм	Желтая (яр)	577,0 нм
Ярко-красная	10	638,30 нм	Желтая (яр)	579,1 нм
Красная	5	653,29 нм	Красная	612,3 нм
Красная	3	667,83 нм		