

Отчёт по лабораторной работе 4.4.3.

Изучение призмы с помощью гониометра.

Работу выполнил Громов Артём
ЛФИ Б02-006

Долгопрудный, 2022 г.

1. Аннотация

Цель работы: Знакомство с работой гониометра, исследование дисперсии стеклянной призмы и определение характеристик призмы как спектрального прибора.

В работе используется: гониометр, ртутная лампа, призма, стеклянная плоскопараллельная пластинка, призмennyй уголковyyй отражатель.

В настоящей работе исследуется дисперсии стеклянных призм — зависимости показателя преломления от длины волны.

Показатель преломления материала призмы удобно определять по углу наименьшего отклонения. Известно, что минимальное отклонение луча, преломленного призмой, от направления луча, падающего на призму, получается при симметричном ходе луча (в призме луч идёт перпендикулярно биссектрисе преломляющего угла). Угол минимального отклонения δ , преломляющий угол α (угол при вершине призмы на рис. 1а) и показатель преломления n связаны между собой соотношением

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

Измерив с помощью гониометра преломляющий угол призмы и углы наименьшего отклонения для света разных длин волн, можно рассчитать величину n и построить дисперсионную кривую — график зависимости $n(\lambda)$.

По дисперсионной кривой могут быть определены такие важные характеристики оптических стёкол, как средняя дисперсия

$$D = n_F - n_C \quad (2)$$

и коэффициент дисперсии ν (число Аббе):

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}. \quad (3)$$

Здесь n_D , n_F и n_C — показатели преломления для $\lambda_D = 589,3$ нм (среднее значение длин волн жёлтого дублета натрия), $\lambda_F = 486,1$ нм (голубая линия водорода), $\lambda_C = 656,3$ нм (красная линия водорода).

По наклону дисперсионной кривой можно оценить разрешающую способность призмы

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = b \frac{dn}{d\lambda}. \quad (4)$$

Здесь $\delta\lambda$ — минимальный интервал длин волн, разрешаемый по критерию Релея, b — размер основания призмы, если вся рабочая грань призмы освещена параллельным пучком.

2. Экспериментальная установка

Гониометр. 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 решёток, измерять длины волн спектральных линий и т. д. В нашей работе для измерения углов используется гониометр Г5.

Оптическая схема гониометра представлена на рис. 1а. Свет от источника S проходит через коллиматор (устройство, дающее параллельный пучок, состоящее из щели 1 и объектива 5) и преобразуется призмой или решёткой в набор параллельных пучков, каждый

из которых соответствует определённой длине волны. Параллельные пучки собираются в фокальной плоскости объектива 9 зрительной трубы и рассматриваются глазом через окуляр 14. При освещении щели ртутной лампой, дающей дискретный спектр, в фокальной плоскости видны отдельные линии — цветные изображения входной щели.

Внешний вид гониометра представлен на рис. 1б и 1в. Коллиматор 3, столик 7 и алидада 17 со зрительной трубой 12 крепятся на массивном основании 23. На столике 7 размещаются исследуемые объекты. Коллиматор закреплён неподвижно, а столик и алидада с трубой могут вращаться вокруг вертикальной оси.

Ширину коллиматорной щели можно менять от 0 до 2-х мм при помощи микрометрического винта 2, высоту — от 0 до 2-х см — при помощи диафрагмы с треугольным вырезом («ласточкин хвост»), надетой на щель. Винт 4 служит для перемещения объектива 5 — настройки коллиматора на параллельный пучок.

Зрительная труба 12 состоит из объектива 9 и окуляра 14 с автоколлимационным устройством 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.

Зрительная труба 12 состоит из объектива 9 и окуляра 14 с автоколлимационным устройством 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 с автоколлимационным устройством приведена на рис. 5а. Свет от лампы Л проходит через защитную стеклянную пластинку П и попадает на автоколлимационную сетку А, содержащую две взаимно перпендикулярные щели (рис. 2б). Свет, прошедший через сетку А, попадает на две прямоугольные призмы Р и отражается от гипотенузной грани, на которую нанесен полупрозрачный слой с коэффициентом отражения 50%. Для юстировки гониометра на столик ставится предмет с плоской отражающей поверхностью. После отражения от неё параллельный пучок лучей возвращается назад в зрительную трубу и собирается в фокальной плоскости объектива. В этом случае светящийся крест можно увидеть через окуляр зрительной трубы. Кроме того, в окуляре имеется ещё одна сетка С, на которой изображён чёрный отсчётный крест (рис. 2в). Совмещённые изображения обоих крестов рассматриваются через окулярные линзы О. Резкость видимого изображения отсчётного креста регулируется вращением оправы окуляра 14.

Обе сетки окуляра, А и С (рис. 2а), расположены на строго одинаковых расстояниях от гипотенузных граней призмы Р, поэтому их одновременное наблюдение в окуляре возможно только при совпадении фокальных плоскостей объектива и окуляра (труба настроена на бесконечность).

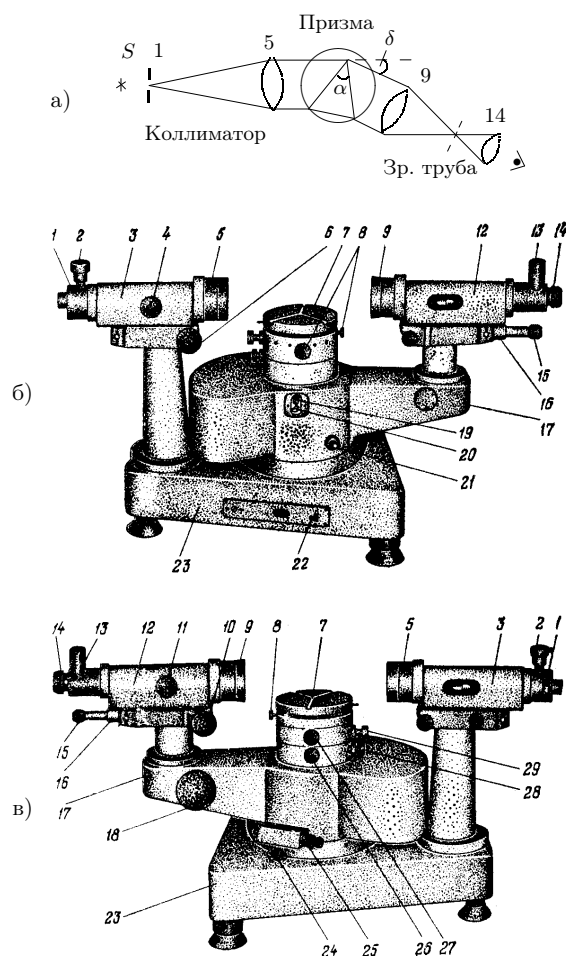


Рис. 1: Оптическая схема и внешний вид гониометра.

Важнейшим узлом гониометра является устройство, служащее для отсчёта 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 разделён на $3 \times 360 = 1080$ делений. Цена деления $20'$, оцифровка делений произведена через 1° . Шкалу лимба можно наблюдать через окуляр отсчётного устройства 16 при включённой подсветке (тумблер 22). Резкость изображения шкалы регулируется вращением оправы окуляра 15.

Оптическая система отсчётного устройства собрана так, что через окуляр можно наблюдать изображения штрихов двух диаметрально противоположных участков лимба, причём одно изображение прямое, а другое обратное (рис. 3). Кроме того, оптическая система позволяет перемещать эти изображения друг относительно друга, оставляя в покое как лимб, так и алидаду со зрительной трубой.

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

Поле зрения отсчётного микроскопа приведено на рис. 6. В левом окне наблюдаются изображения диаметрально противоположных участков лимба и вертикальный штрих для отсчёта градусов, в правом — деления шкалы оптического микрометра и горизонтальная риска А для отсчёта минут и секунд.

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

1. Алидада вращается относительно лимба и столика либо грубо от руки при свободном винте 24 (см. рис. 4), либо точно с помощью микрометрического винта 25 при зажатом винте 24.

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, винт 26 свободен).

4. Вращение столика вместе с лимбом относительно алидады производится либо от руки при свободном винте 26, либо микрометрическим винтом 28 при зажатом винте 26.

5. Столик вращается относительно алидады и лимба либо от руки при свободном винте 27, либо точно микрометрическим винтом 29 при зажатом винте 27 (рычажок 20 в верхнем положении).

Гониометр требует тщательной юстировки, которая заключается в установке: а) зрительной трубы на бесконечность; б) поверхности столика и оптической оси трубы — перпендикулярно оси вращения прибора; в) коллиматора — на параллельный пучок лучей; г) оптической оси коллиматора — перпендикулярно оси вращения прибора.

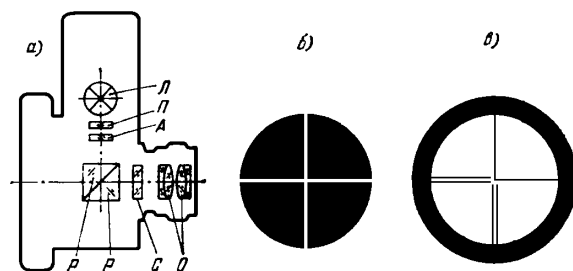


Рис. 2: Автоколлимационное устройство.

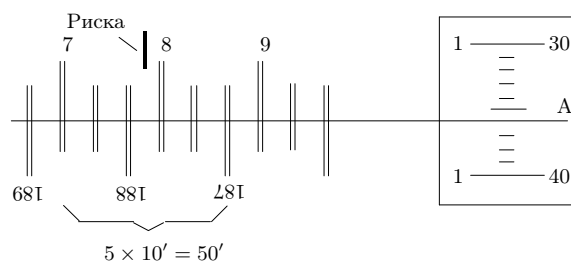


Рис. 3: Поле зрения отсчётного микроскопа ($7^\circ 51' 36''$).

3. Результаты измерений и обработка данных

3.1. Измерение преломляющего угла

Для измерения преломляющего угла призмы установим трубу перпендикулярно одной из её отражающих граней и запишем значение угла $\alpha = 0^\circ 1' 0''$. Затем, не трогая призму и столик, повернём алидаду с трубой вокруг преломляющего угла призмы и проведём ту же операцию для другой рабочей грани $\alpha_2 = 60^\circ 5' 8'' \pm 0^\circ 0' 1''$. По углу поворота трубы рассчитаем преломляющий угол призмы $\alpha = |\alpha_1 - \alpha_2| = 60^\circ 4' 8'' \pm 0^\circ 0' 0''$.

3.2. Минимальный угол отклонения

Найдём спектр в зрительную трубу, настроимся на одну из жёлтых линий и, вращая столик сначала рукой, а затем винтом тонкой подачи 29 при зажатом винте 27, установим его в такое положение, при котором отклонение выбранной спектральной линии от направления оси коллиматора оказывается наименьшим.

Для каждой линии спектра найдите свой минимум отклонения. Данные занесём в таблицу 1.

Таблица 1.
Наименьший угол отклонения для различных волн.

λ , нм	690.7	623.4	579.1	577.0	546.1	491.6	435.8	404.7
δ	$51^\circ 0' 49''$	$51^\circ 37' 25''$	$52^\circ 1' 15''$	$52^\circ 2' 14''$	$52^\circ 22' 32''$	$53^\circ 9' 17''$	$54^\circ 20' 46''$	$55^\circ 19' 26''$
n	1.648283	1.654287	1.658172	1.658332	1.661625	1.669152	1.680513	1.689701
σ_n	5e-06	5e-06	5e-06	5e-06	5e-06	5e-06	5e-06	5e-06

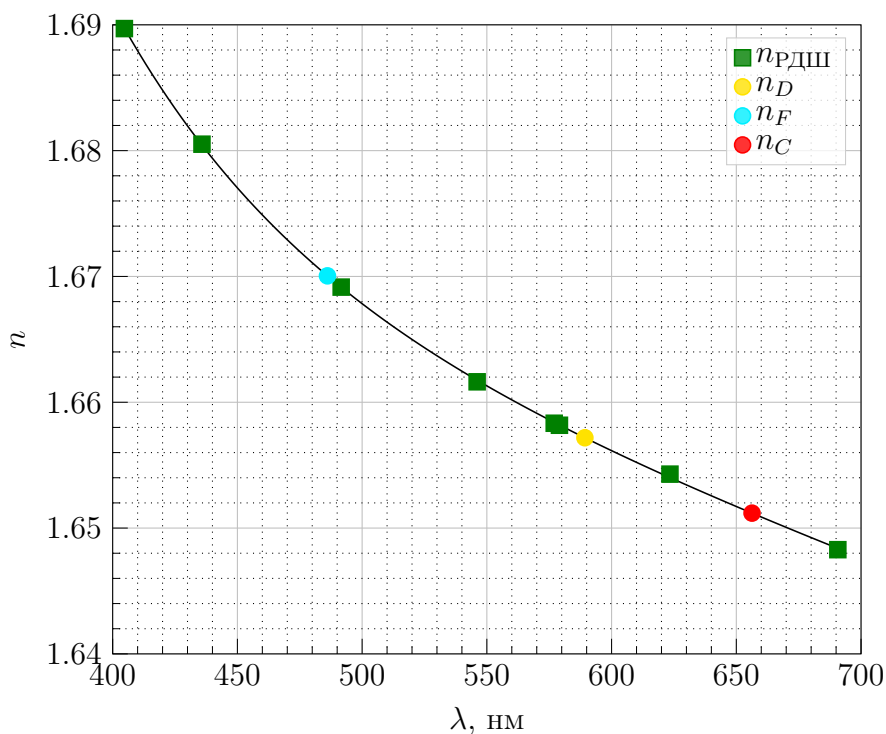


Рис. 4: Дисперсионная кривая $n(\lambda)$.

Рассчитаем значения показателя преломления для спектра ртутной лампы по формуле (1). Данные поместим в таблицу 1. Построим дисперсионную кривую и аппроксимируем её функцией

$$n = p_1 T(0, y(\lambda)) + p_2 T(1, y(\lambda)) + p_3 \exp(-p_4 y(\lambda)), \quad (5)$$

где $T(n, y)$ — полином Чебышева n -ой степени, а $y(\lambda)$ — отображение в отрезок $[-0.25, 0.25]$.

3.3. Число Аббе и средняя дисперсия.

Определим по графику значения $n_D = 1.6572$, $n_F = 1.6700$, $n_C = 1.6512$. Используя формулу (2), получим $D = 0.019$. Из (3) следует, что $ni = 34.846$.

Исходя из данных на рисунке 5, мы можем сделать вывод, что стекло призмы — это или бариевый тяжёлый флинт, или тяжёлый флинт.

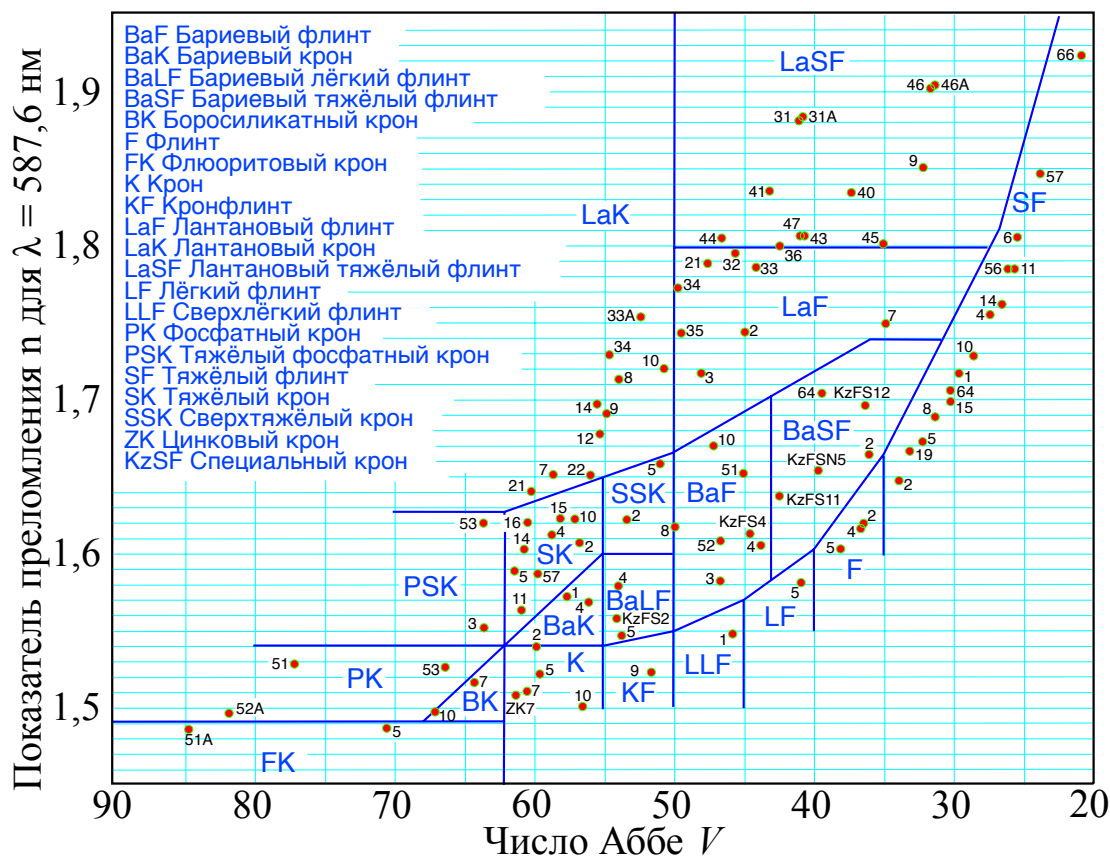


Рис. 5: Диаграмма Аббе для оптических стёкол.

3.4. Разрешающая способность

Рассчитаем максимальную разрешающую способность призмы по формуле (4). Значение производной на возьмём в точке с длиной волны 579.1 нм. Основание призмы равно $b = 7.3 \pm 1$ см. В итоге получим $R = b \frac{dn}{d\lambda} = (74 \pm 1) \cdot 10^2$.

Выполним обратную задачу. Используя жёлтую линию спектра с длиной волны $\lambda = 579.1$ нм вычислим размер основания призмы. Измерения дают следующие результаты $\delta\lambda = 0^\circ 0' 5''$. Значит $b = 0.7 \pm 0.1$ мм.

Оценим, при каком размере решётки, имеющей 100 штр/мм, она обладает такой же разрешающей способностью в первом порядке, как призма с основанием $b = 5$ см. Тогда $a \cdot 100 \text{ штр/мм} = R$, значит $a = 74$ мм.

Рассчитаем угловую дисперсию $d\phi/d\lambda$ по измерениям жёлтого дублета и сравним её с дисперсией решётки в первом порядке, имеющей 100 штр/мм. Из измерений имеем $d\phi/d\lambda = 1360^\circ/\text{нм}$. Для решётки $D = \frac{1}{100 \text{ штр/мм}} = 5.73^\circ/\text{нм} \cdot 10^5$.

4. Обсуждение результатов

Благодаря гониометру погрешности очень маленькие. Однако не удалось определить погрешности для коэффициентов функции аппроксимации.

5. Вывод

Результаты работы можно считать удовлетворительными, но не удалось точно определить сорт стекла.

α_1 α_2
 $0^\circ 1' 0''$ $60^\circ 5' 8''$

σ_{α}
 $0^\circ 0' 1''$

SL, cm
7.3

λ, δ
690.7 $51^\circ 0' 49''$
623.4 $51^\circ 37' 25''$
579.1 $52^\circ 1' 15''$
577.0 $52^\circ 2' 14''$
546.1 $52^\circ 22' 32''$
491.6 $53^\circ 9' 17''$
435.8 $54^\circ 20' 46''$
404.7 $55^\circ 19' 26''$

