

ГОУ «ПРИДНЕСТРОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. Т. Г. ШЕВЧЕНКО»

**Физико-технический институт  
Физико-математический факультет**

*Кафедра фундаментальной физики, электроники и систем связи*

**ВЫПОЛНЕНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ  
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ  
ПО РАЗДЕЛУ "ОПТИКА"  
КУРСА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ**

*Методические рекомендации*

Тирасполь  
Издательство  
Приднестровского  
университета  
2024

УДК 535(076.58)  
ББК В34я73-5  
В92

*Составители:*

**Е.И. Брусенская**, канд. физ.-мат. наук, доц.

**Р.А. Хамидуллин**, канд. физ.-мат. наук, доц.

**В.Н. Чебан**, канд. физ.-мат. наук, доц.

*Рецензенты:*

**К.Д. Ляхомская**, канд. физ.-мат. наук, доц., начальник Управления научной деятельности ГОУ «ПГУ им. Т.Г. Шевченко»

**С.М. Соковнич**, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры фундаментальной физики, электроники и систем связи ФМФ, ФТИ, ГОУ «ПГУ им. Т.Г. Шевченко»

**Выполнение и оформление лабораторных работ по разделу «Оптика» курса общей физики: методические рекомендации / ГОУ «Приднестр. гос. ун-т им. Т.Г. Шевченко», физ.-тех. институт, физ.-мат. фак.; сост.: Е.И. Брусенская, Р.А. Хамидуллин, В.Н. Чебан. – Тирасполь: Изд-во Приднестр. ун-та, 2024. – 112 с.**

*Данные методические рекомендации составлены для студентов, выполняющих цикл лабораторных работ по оптике, согласно требованиям ФГОС. Пособие включает в себя общие правила оформления отчётов к лабораторным работам, основные методы расчета погрешностей измерения, перечень работ из цикла оптика и методические указания к каждой работе из перечня. Представленное методическое пособие должно помочь студентам в подготовке, выполнении и оформлении отчетов лабораторных работ из раздела оптика, а также к их последующей защите.*

*Адресовано студентам всех направлений подготовки.*

УДК 535(076.58)

ББК В34я73-5

Рекомендовано Научно-методическим советом ПГУ им. Т.Г. Шевченко

© Брусенская Е.И., Хамидуллин Р.А., Чебан В.Н., составление, 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Оформление и выполнение лабораторных работ по оптике	4
2. Обработка результатов измерений	9
3. Перечень лабораторных работ по разделу оптика общего физического практикума	16
4. Методические указания к лабораторным работам по оптике	17
• Лабораторная работа № 4.01 Определение фокусного расстояния собирающей и рассеивающей линз, определение фокусного расстояния и радиуса кривизны вогнутого сферического зеркала	17
• Лабораторная работа № 4.02 Определение сферической и хроматической аберраций линз	31
• Лабораторная работа № 4.03 Изучение микроскопа. Определение увеличения объектива. Измерение величины предмета	40
• Лабораторная работа № 4.04 Определение показателя преломления стекла с помощью микроскопа.	48
• Лабораторная работа № 4.05 Определение длины световой волны с помощью бипризмы Френеля.	58
• Лабораторная работа № 4.06 Определение радиуса кривизны линзы и длины световой волны с помощью колец Ньютона	68
• Лабораторная работа № 4.07 Определение показателя преломления и концентрации раствора сахара при помощи рефрактометра РПЛ	76
• Лабораторная работа № 4.08 Определение концентрации раствора сахара поляриметром	83
• Лабораторная работа № 4.09 Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки	93
• Лабораторная работа № 4.10 Проверка закона Малюса	104
Литература	111

# 1. ОФОРМЛЕНИЕ И ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ОПТИКЕ

Лабораторные работы по оптике из общего физического практикума знакомят студентов с разнообразными физическими явлениями не только в теоретическом аспекте, но и практическом. Они дают возможность оценить учащимся полученные результаты и сделать на их основе самостоятельные выводы о закономерностях протекания оптических явлений. В лабораторном практикуме студенты учатся использовать разнообразные оптические устройства и приборы – микроскопы, линзы, сферические зеркала, рефрактометры, поляриметры, билинзы и бипризмы Френеля, дифракционные решетки для наблюдения оптических явлений и расчета физических величин с ними связанных.

Каждая работа начинается с определения основной ее учебно-методической цели и указания устройств, которые для ее достижения будут использованы. Затем излагается теоретический материал, который раскрывает изучаемую тему и позволяет ответить на ряд вопросов в конце работы. В работе приведены выводы основных соотношений, необходимых для расчетов физических величин. В таблицах к лабораторным работам выделены наблюдаемые и расчетные величины.

В каждой лабораторной работе содержатся вопросы двух типов: для допуска к их выполнению и контрольные вопросы. Эти вопросы в полной мере позволяют определить степень понимания студентом изучаемого материала. В конце методических рекомендаций представлен список рекомендуемой литературы для более глубокого изучения теории изучаемых физических явлений.

Выполнять и защищать лабораторные работы студенты должны по учебному расписанию и в соответствии с графиком работы лаборатории общей и медицинской физики.

Перед каждым лабораторным занятием студент должен предварительно подготовиться:

- а) ознакомиться с содержанием лабораторной работы по методическим рекомендациям и проанализировать его;
- б) изучить дополнительную литературу по теме работы по учебникам, указанным в конце методических рекомендаций;

в) составить бланк отчета «полуотчет» к лабораторной работе. «Полуотчет» выполнить на листах стандартного размера 297×210 мм (формат А4) (можно взять развернутый лист обычной тетради в клетку, укороченный на 7 клеток снизу). Записи на оборотной стороне листа не допускаются.

«Полуотчет» включает в себя:

- 1) титульный лист оформленный по образцу (Приложение 1);
- 2) приборы и принадлежности;
- 3) теоретическую часть;
- 4) описание метода измерений и установки;
- 5) порядок выполнения лабораторной работы;
- 6) таблицы для записи в них результатов измерений;
- 7) вопросы для допуска и ответы на эти вопросы;
- 8) контрольные вопросы;
- 9) список литературы.

Студенты допускаются к выполнению следующей лабораторной работы только в том случае, если они защитили отчет по предыдущей работе и ответили на вопросы допуска новой работы. Учащийся готов к занятию при наличии у него «полуотчета» по работе, которую он должен выполнить и наличии ответов на вопросы допуска.

Получив допуск, студенты могут приступить к выполнению лабораторной работы в лаборатории общей и медицинской физики физико-технического института. При этом они должны соблюдать следующие требования:

1. В лаборатории необходимо руководствоваться правилами техники безопасности:

2. В ходе выполнения практической части лабораторной работы запрещается заниматься посторонними делами, подходить к другим установкам и мешать выполнению работ другими студентами.

3. Студенты работают в группах по два человека (при нечетном количестве студентов в подгруппе (группе) возможно три человека) согласно распределению преподавателя.

4. У каждого студента должен быть индивидуальный отчет.

5. Не выполненные без уважительной причины работы выполняются с разрешения преподавателя в специально отведенное время.

ПРИДНЕСТРОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ.Т.Г.ШЕВЧЕНКО

**КАФЕДРА ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ,  
ЭЛЕКТРОНИКИ И СИСТЕМ СВЯЗИ**

ЛАБОРАТОРИЯ ОБЩЕЙ И МЕДИЦИНСКОЙ ФИЗИКИ

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № \_\_\_\_**

**Тема:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Цель работы:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Допуск к лабораторной работе

Дата \_\_\_\_\_

Подпись \_\_\_\_\_

Выполнение лабораторной работы:

Дата \_\_\_\_\_

Подпись \_\_\_\_\_

Работу выполнил студент

Гр. \_\_\_\_\_

Факультет \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ф.И.О

Работу проверил

преподаватель кафедры ФФЭСС

\_\_\_\_\_

Ф.И.О

**Тирасполь, 202\_ г.**

На первом этапе практической работы студенты изучают установку, на которой будут работать: инструменты, приборы, отдельные устройства. Особое внимание уделяется метрологическим характеристикам элементов установки, к которым относятся: диапазон измерений, цена делений, единицы измерений.

Следующий этап работы заключается в монтаже и наладке экспериментальной установки (если это необходимо). Установка, собранная студентом, должна быть проверена преподавателем или специалистом. После этой проверки студент может самостоятельно выполнять работу. Сначала учащийся несколько раз прослеживает явление и учится управлять установкой. Затем проводит так называемые «прицелочные» измерения и приступает к записи показаний приборов.

Результаты измерений заносятся в таблицу в тех единицах, в которых снимаются показания приборов (это – не обязательно единицы СИ). Полученные результаты представляются специалисту, который расписывается в «получетке» на титульном листе о выполнении практической части работы.

Затем с разрешения специалиста нужно выключить установку, привести в порядок рабочее место и сдать ему принадлежности к лабораторной работе.

После выполнения практической части лабораторной работы студент завершает оформление отчета к ней. Для этого «получетку», оформленную при подготовке к занятию, дополняется следующим содержанием:

- 1) таблицей с результатами вычислений;
- 2) обработкой результатов всех прямых и косвенных измерений;
- 3) расчетом искомых величин в единицах СИ;
- 4) графиками (если это необходимо);
- 5) выводами.

Для того чтобы отчет был четким и аккуратным, студент должен иметь рабочую (черновую) тетрадь, в которой проводится расчет искомых физических величин, погрешностей измерений и т.д. Все этапы этих расчетов необходимо кратко отразить в отчете.

Выводы отчета должны опираться на анализ выявленных в работе закономерностей, связей между различными физическими величинами, на сравнение полученных результатов с теоретическими и табличными.

Защита лабораторной работы проводится на занятии по расписанию и включает в себя такие элементы, как:

- а) обсуждение ее экспериментальной части;
- б) анализ полученных результатов;
- в) обсуждение контрольных вопросов, приведенных в конце каждой работы;
- г) анализ поэтапных расчетов искомых физических величин для контроля конечного результата и устранения ошибок при наличии.

Иногда темы лабораторных работ опережают изучаемый на лекциях материал. В этом случае необходимо проводить дополнительную работу с учебниками, учебными пособиями и справочной литературой, указанными в списке рекомендуемой литературы.

## 2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Обработка результатов лабораторных измерений включает в себя сами измерения, определение типа измерений (прямые или косвенные) и оценку их погрешностей.

Измерение и оценка определенных физических величин, наблюдаемых при протекании какого-либо явления является целью любого эксперимента. В разделе «Оптика» приходится измерять и оценивать такие физические величины как фокусное расстояние линзы, ее оптическую силу, интенсивность излучения, длину волны, показатель преломления и другие.

Невозможно получить абсолютно точного значения при измерении любой физической величины. Причина кроется в том, что используемые методы измерения и устройства не являются совершенными. Кроме того, всегда существует ряд факторов, связанных с побочными эффектами, которыми наблюдатель пренебрегает. Поэтому при любых измерениях неизбежны погрешности и главной задачей наблюдателя является установление интервала возможных значений, в пределах которого находится истинное значение измеряемой величины.

### **Прямые и косвенные измерения в оптике**

Все измерения делятся на прямые и косвенные. В первом случае искомая величина определяется непосредственно с помощью измерительного прибора, например, измерение расстояния от линзы до экрана – линейкой, измерение освещенности – люксметром и т.д.

При косвенных измерениях искомую величину находят в результате математических действий над результатами прямых измерений. Например, определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки, осуществляется путем измерения расстояния между максимумами определенных порядков, расстояния от решетки до экрана при известном ее периоде.

### **Классификация погрешностей измерения**

Возникающие в ходе эксперимента погрешности имеют различные причины. Поэтому на практике все погрешности (ошибки) измерения можно разделить на три вида:

1. *Промахи или грубые ошибки.* Такие ошибки возникают в результате небрежности, допущенной при снятии показаний по приборам или неверной записи показаний и так далее. Промахи и грубые ошибки можно устранить повторными измерениями.

2. *Систематические ошибки* – ошибки, сохраняющиеся при повторных измерениях. Причинами таких ошибок могут быть следующие факторы: погрешность прибора (сферическая поверхность линзы или зеркала не идеальна); отсутствие учета влияния внешних факторов (зависимость показателя преломления света от длины волны для немонахроматического излучения). Систематические ошибки учитывают приборными или факторными поправками.

3. *Случайные ошибки* проявляются в разбросе результатов при повторных измерениях. Случайные ошибки обусловлены большим числом случайных причин, которые действуют в каждом отдельном измерении непредсказуемым образом. Они обнаруживаются при достаточно высокой чувствительности оптического устройства. Исключить случайные ошибки в отдельных измерениях практически невозможно.

### **Вычисление погрешностей прямых измерений**

Основой оценки погрешностей измерений является определение абсолютной и относительной погрешности и среднего значения физической величины. Для прямых и косвенных измерений методы оценки погрешности отличаются. Рассмотрим оценку погрешностей для **прямых измерений**.

Пусть были сделаны  $n$  прямых измерений некой физической величины  $x$ , т.е. имеются значения  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

**Средним арифметическим значением** этой величины будет являться отношение суммы всех измеренных значений этой величины к полному числу измерений. Математически среднее арифметическое значение можно найти по формуле:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}.$$

**Абсолютная погрешность измерения** равна разности среднего значения физической величины и измеренного значения,

взятой по модулю. Ее можно рассчитать для каждого измерения по формуле:

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= |< x > - x_1|, \\ \Delta x_2 &= |< x > - x_2|, \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta x_n &= |< x > - x_n|.\end{aligned}$$

Величина  $\Delta x_i$  соответствует абсолютной погрешности  $i$ -го измерения. Единицы измерения абсолютных погрешностей совпадают с единицами измерения самой величины.

**Среднее арифметическое значение абсолютной погрешности** измерения определяется соотношением:

$$\Delta x_{cp} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n}{n}.$$

Результат измерения физической величины  $x$  представляется в виде:

$$x = < x > \pm \Delta x_{cp}$$

с указанием размерности величин  $x$  и  $\Delta x$ . Второе слагаемое определяет диапазон разброса значений измеряемой физической величины

В некоторых случаях необходимо оценить среднюю квадратичную и наиболее вероятную ошибки. Способ определения таких величин известен в теории вероятности. **Средняя квадратичная погрешность** рассчитывается по формуле:

$$\Delta x_{кв} = t \cdot \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}},$$

где  $n$  – количество измерений,  $t$  – коэффициент Стьюдента, зависящий от  $n$  и задаваемого коэффициента надежности  $\alpha$ .

Коэффициенты Стьюдента определяются по специальным таблицам. В этом случае окончательный результат представляется в виде:

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x_{\text{кв}}$$

В отчете также необходимо рассчитать относительную погрешность измерения, которая определяется соотношениями:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x_{\text{ср}}}{\langle x \rangle} \cdot 100\%$$

или

$$\varepsilon = \frac{\Delta x_{\text{кв}}}{\langle x \rangle} \cdot 100\%$$

**Относительная погрешность измерения** есть безразмерная величина, равная отношению среднего или среднеквадратичного значения абсолютной погрешности к среднему значению измеряемой величины, взятому в процентах.

Помимо оценки абсолютных и относительных погрешностей измерения в физике и технике оценивают такие же погрешности для эксперимента в целом. При этом производится сравнение среднего значения физической величины и его теоретического или табличного значения, если таковые имеются.

Тогда абсолютной погрешностью эксперимента называют модуль разности среднего значения физической величины и его теоретического или табличного значения:

$$\Delta x_s = \left| \langle x \rangle - x_m \right|$$

Относительной погрешностью эксперимента называют отношение абсолютной погрешности эксперимента к теоретическому или табличному значению физической величины:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta x_s}{x_m} \cdot 100\%$$

### **Вычисление погрешностей косвенных измерений**

В основном измеряемые физические величины определяются **косвенным способом**, так как они выражаются через другие физические величины, измеряемые прямыми методами. В этом

случае определяется максимальная систематическая погрешность метода измерений.

Для расчёта ошибок косвенных измерений необходимо учитывать следующие правила работы с ними:

1. Абсолютная погрешность суммы равна сумме абсолютных погрешностей слагаемых:

$$\Delta(U+V) = \Delta U + \Delta V .$$

2. Абсолютная погрешность разности равна сумме абсолютных погрешностей уменьшаемого и вычитаемого:

$$\Delta(U-V) = \Delta U + \Delta V .$$

3. Абсолютная погрешность произведения двух сомножителей равна сумме произведений первого сомножителя на абсолютную погрешность второго и второго сомножителя на абсолютную погрешность первого:

$$\Delta(UV) = U \cdot \Delta V + \Delta U \cdot V .$$

4. Абсолютная погрешность дроби равна сумме произведений знаменателя на абсолютную погрешность числителя и числителя на абсолютную погрешность знаменателя, деленной на квадрат знаменателя:

$$\Delta\left(\frac{U}{V}\right) = \frac{\Delta U \cdot V + U \cdot \Delta V}{V^2} .$$

Эти правила следуют из правил дифференцирования.

Рассмотрим разложение некой функции, соответствующей физической величине в ряд Тейлора:

$$y \pm dy = f(x \pm dx) = f(x) \pm \frac{df(x)}{dx} dx + \frac{1}{2} \frac{d^2 f(x)}{dx^2} (dx)^2 + \dots$$

Ограничиваясь первыми двумя членами, получим:

$$y \pm dy = f(x \pm dx) = f(x) \pm \frac{df(x)}{dx} dx .$$

Откуда

$$dy = \frac{df(x)}{dx} dx .$$

Для нахождения относительной погрешности

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} ,$$

можно воспользоваться тем, что

$$d(\ln x) = \frac{dx}{x}$$

или

$$\Delta(\ln < x >) = \frac{\Delta x}{x} .$$

Поэтому относительную ошибку косвенных измерений можно найти путем логарифмирования исходного выражения и последующего дифференцирования с учетом замены знака дифференциала и выбора знаков таким образом, чтобы абсолютная величина относительной ошибки была максимальной.

### Представление экспериментальных результатов графически

В некоторых лабораторных работах возникает необходимость представить полученные результаты графически в виде некой зависимости, и используя график, найти необходимую величину. Для того, чтобы качественно построить график, необходимо правильно выбрать систему координат, диапазон откладываемых величин и масштаб. Немаловажным моментом также является выбор бумаги.

**Выбор бумаги.** Графики удобно строить на миллиметровой бумаге. Использование бумаги со специальной нелинейной координатной сеткой не допускается. Бумага должна иметь размер обычного тетрадного или альбомного листа.

**Выбор координатных осей.** Координатным осям должны соответствовать измеренные в процессе выполнения лабораторной

работы физические величины, между которыми в соответствии с заданием нужно установить связь. При этом, по оси ординат откладывают значения функции, по оси абсцисс – значения аргумента.

**Выбор диапазона.** На графике указывается только тот диапазон изменения физических величин, который был исследован на опыте. Не обязательно, чтобы на графике помещалось начало координат, если оно не является результатом измерения.

**Выбор масштабов.** Масштабы по обеим осям выбираются независимо друг от друга. График получается более наглядным, если основная часть кривой имеет наклон, близкий к  $45^{\circ}$ . Масштаб должен быть удобным. Миллиметр миллиметровой бумаги может соответствовать 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10 и т.д. единицам измеряемой величины. Густота меток на осях не должна быть слишком большой. Достаточно нанести их через 2 см или даже через 5 см. На осях обязательно указываются обозначения и единицы измерения соответствующих величин. В случае очень больших или очень малых величин множители, определяющие порядок чисел, рекомендуется учитывать при обозначении.

**Нанесение точек на график.** Точки, наносимые на график, нужно изображать четко и ясно, используя простой карандаш, чтобы в случае ошибки их можно было легко удалить с графика. Никаких линий и отметок, поясняющих построение точек, на график наносить нельзя. Возможны случаи, когда в одной и той же координатной плоскости строится несколько кривых. При этом точки, относящиеся к разным кривым, должны быть помечены различными символами (кружки, крестики, треугольники и т. п.) или цветами, чтобы их нельзя было перепутать.

**Проведение кривой по нанесенным точкам.** Кривую на графике проводят плавно, без изломов и перегибов так, чтобы она располагалась возможно ближе ко всем точкам и по обе ее стороны оказалось приблизительно равное их количество. Ни в коем случае не следует проводить кривую через каждую точку. Отклонение точек от кривой отражает наличие погрешностей. Кривую проводят карандашом от руки. Если на графике имеется несколько кривых, то каждой из них присваивается свой номер.

**Оформление графиков.** Готовый график вклеивается в отчет и снабжается информационной надписью об установленной зависимости определенных величин.

### 3. ПЕРЕЧЕНЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО РАЗДЕЛУ ОПТИКА ОБЩЕГО ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА

1. Определение фокусного расстояния собирающей и рассеивающей линз, определение фокусного расстояния и радиуса кривизны вогнутого сферического зеркала.

2. Наблюдение сферической и хроматической aberrаций линз.

3. Изучение микроскопа. Определение увеличения объектива. Измерение величины предмета.

4. Определение показателя преломления стекла с помощью микроскопа.

5. Определение длины световой волны с помощью бипризмы Френеля.

6. Определение радиуса кривизны линзы и длины световой волны с помощью колец Ньютона.

7. Определение показателя преломления и концентрации раствора сахара при помощи рефрактометра РПЛ.

8. Определение концентрации раствора сахара поляриметром.

9. Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки.

10. Проверка закона Малюса.

## 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ОПТИКЕ

### *Лабораторная работа № 4.01*

#### Тема: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ СОБИРАЮЩЕЙ И РАССЕИВАЮЩЕЙ ЛИНЗ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ И РАДИУСА КРИВИЗНЫ ВОГНУТОГО СФЕРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА

**Цель работы:** Определение фокусного расстояния собирающей и рассеивающей линз, определение фокусного расстояния и радиуса кривизны вогнутого сферического зеркала.

**Приборы и принадлежности:** собирающая и рассеивающая линзы, вогнутое зеркало, источник света, экран, оптическая скамья.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

**Линзы** – оптические устройства, которые могут изменять наблюдаемые размеры предметов за счет преломления световых лучей. В результате, полученные в линзах изображения могут иметь большие или меньшие размеры по сравнению с истинными размерами предметов. Линзы представляют собой прозрачные тела, ограниченные двумя поверхностями. Чаще всего одна из плоскостей сферическая или цилиндрическая, а вторая – сферическая или плоская. Материалом для линз служат минеральные стекла, кварц, органические полимеры и так далее. По форме ограничивающих поверхностей линзы делятся на (рис. 1): 1) двояковыпуклые; 2) плосковыпуклые; 3) двояковогнутые; 4) плосковогнутые; 5) выпукло-вогнутые; 6) вогнуто-выпуклые. По способности фокусировать свет **линзы** делятся на собирающие и рассеивающие.

Точки пересечения поверхностей с оптической осью называются **вершинами** преломляющих поверхностей. Расстояние между этими вершинами называют **толщиной** линзы. Если толщиной линзы можно пренебречь по сравнению с наименьшим радиусом кривизны поверхностей, то линзу называют **тонкой**.

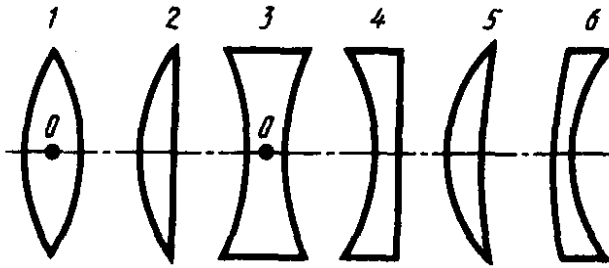


Рис. 1. Виды линз по форме ограничивающих поверхностей

Прямая, проходящая через центры кривизны поверхностей линзы, называется **главной оптической осью**  $O_1O_2$ . Для всякой линзы существует точка, называемая **оптическим центром линзы**  $O$ . Оптический центр находится на главной оптической оси и обладает тем свойством, что лучи проходят через него не преломляясь. Оптический центр  $O$  линзы для простоты будем считать совпадающим с геометрическим центром средней части линзы (это справедливо только для двояковыпуклой и двояковогнутой линз с одинаковыми радиусами кривизны обеих поверхностей; для плосковыпуклых и плосковогнутых линз оптический центр  $O$  лежит на пересечении главной оптической оси со сферической поверхностью).

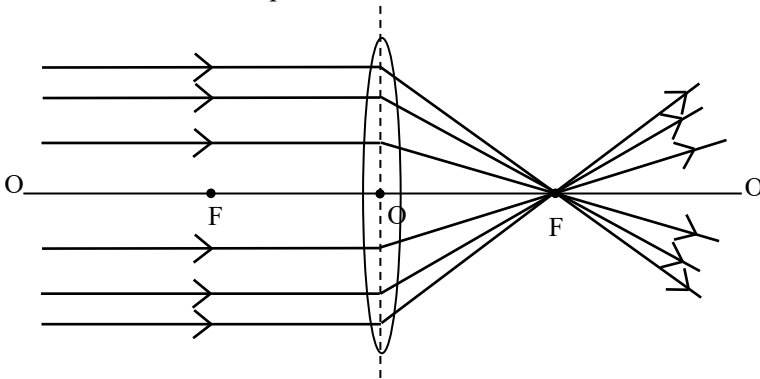
**Главным фокусом** линзы называется точка, в которой пересекаются после преломления в линзе лучи (рис. 2) или их продолжения (рис. 3), при падении на нее плоскопараллельного пучка света (лучи параллельны главной оптической оси). Плоскость, проходящая через фокус линзы и перпендикулярная оптической оси, называется **фокальной плоскостью**.

Помимо главной оптической оси большое значение в построения играет и побочная ось. **Побочной осью** называют любую прямую, проходящую через оптический центр под некоторым углом к главной оси и пересекающая фокальную плоскость в некоторой точке. Эта точка называется **побочным фокусом**.

Расстояние от фокуса до оптического центра линзы  $OF$  – называется **главным фокусным расстоянием**. Для собирающих линз главное фокусное расстояние величина положительная, для рассеивающих - отрицательная. Величина обратная фокусному расстоянию, которое выражено в метрах, называется **оптической силой** линзы:

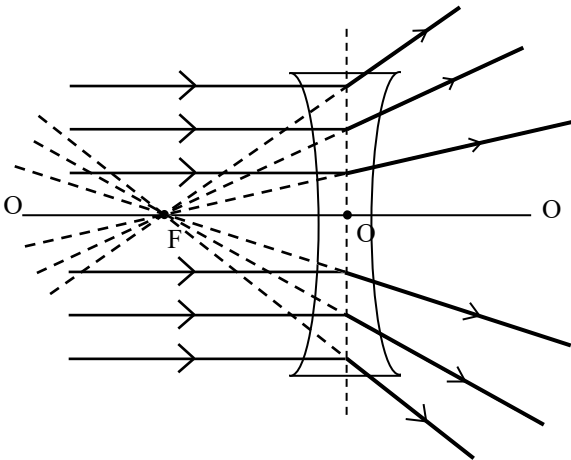
$$D = \frac{1}{OF} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

Единицей измерения оптической силы линзы является диоптрия, которой соответствует оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м: 1 дптр = 1/м.



**Рис. 2.** Фокус в собирающей линзе

Для рассеивающих линз главный фокус является мнимым, и для его нахождения берут не сами лучи, а их продолжение (рис. 3).



**Рис. 3.** Фокус в рассеивающей линзе

В схемах оптических устройств тонкие линзы изображаются как на рисунках, приведенных ниже (рис. 4.):

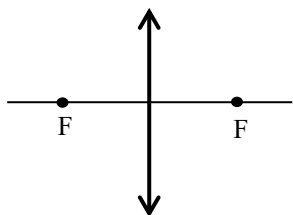


Рисунок 4а. Собирающая линза

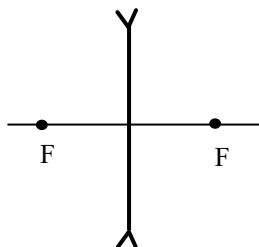


Рисунок 4б. Рассеивающая

Для построения изображения предмета с помощью линзы пользуются лучами, ход которых через линзу известен. Обычно берут два луча из следующих трех (рис.5):

- луч 1, проходящий через оптический центр, который не преломляется;
- луч 2, проходящий параллельно главной оптической оси, который при выходе из линзы соберётся в главном фокусе;
- луч 3, проходящий через главный фокус, который, выйдя из линзы, будет распространяться параллельно ее главной оптической оси.

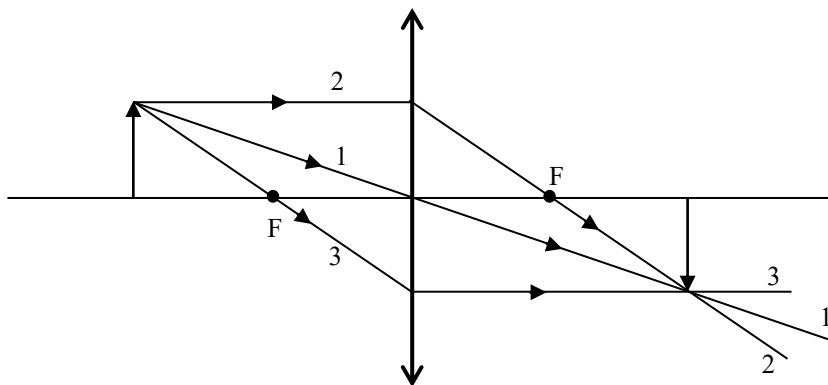


Рис. 5. Ход лучей в собирающей линзе

Изображение предмета  $AB$  в зависимости от вида линзы и от того, на каком расстоянии от этой линзы будет находиться предмет, может получиться увеличенным или уменьшенным, прямым или обратным, действительным или мнимым.

Мнимым изображением предмета называют такое его изображение, которое находится в одной плоскости с предметом. Такое изображение получается в рассеивающих линзах и в собирающей, если предмет находится от оптического центра линзы на расстоянии меньшем фокусного. В первом случае оно будет уменьшенным, а во втором – увеличенным. Так как изображение будет находиться в верхней полуплоскости по отношению к оптической оси, то оно в обоих случаях будет прямым.

Действительное изображение предмета имеет место, когда предмет и изображение находятся по разные стороны от линзы. Такие изображения возникают в собирающих линзах, когда предмет находится на расстояниях больше фокусного. Изображение в этом случае является обратным. Обратное изображение, по отношению к предмету, лежит в другой полуплоскости относительно оптической оси. Собирающие линзы всегда дают увеличенное изображение.

Делая построение, мы ограничились лучами, образующими малые углы с оптической осью линзы (параксиальные лучи).

Обозначим через « $a$ » расстояние от предмета до линзы (рис. б), а через « $b$ » - расстояние от линзы до изображения. Тогда формула тонкой собирающей линзы будет иметь вид:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

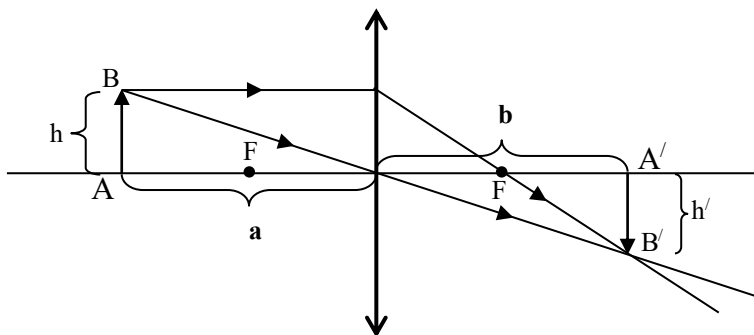


Рис. 6. Построение изображения в тонкой линзе

Здесь расстояние  $b$  положительное для действительных изображений и отрицательное для мнимых.

Для рассеивающей линзы формула будет иметь вид:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = -\frac{1}{f}, \quad (3)$$

Знаки «-» в соотношении (3) указывают на то, что фокусное расстояние и расстояние от линзы до изображения являются мнимыми.

Линейное увеличение, даваемое тонкой линзой можно рассчитать по формуле согласно геометрии (рис. 6):

$$\Gamma = \frac{h'}{h} = \frac{b}{a} \quad (4)$$

*Линейным увеличением* называется отношение размера изображения предмета к соответствующему размеру предмета или отношение расстояния от оптического центра до изображения к расстоянию от оптического центра до предмета (для мнимых значений расстояния берутся по модулю).

Для определения главного фокусного расстояния линз пользуются оптической скамьей (рис. 7). В нашем случае оптическая скамья – деревянная рельса, снабженная линейкой. Вдоль скамьи могут перемещаться на рейтерах (ползунках) линзы, экран, зеркало, источник света, предмет (диапозитив).

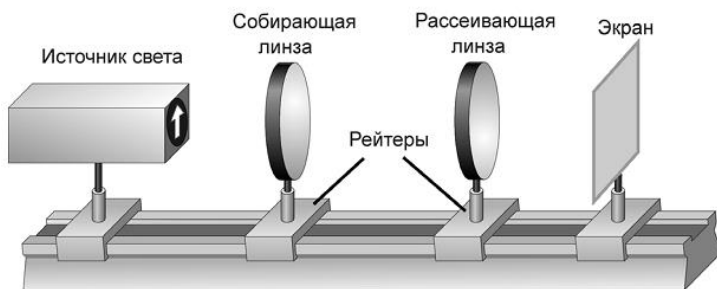


Рис. 7. Оптическая скамья

Предмет, линзы, зеркало, экран нужно установить так, чтобы их центры лежали на одной прямой, параллельной ребру оптической скамьи. Такая прямая называется оптической осью установки.

Определение главного фокусного расстояния выпуклой и вогнутой линз отличается, поэтому удобнее рассмотреть эти случаи отдельно (см. ход работы).

Простейшим оптическим устройством, способным создавать изображение предмета, является плоское зеркало. Изображение предмета, даваемое плоским зеркалом, формируется за счет лучей, отраженных от зеркальной поверхности. Это изображение является мнимым, так как оно образуется пересечением не самих отраженных лучей, а их продолжений в «зазеркалье» (рис. 8). На рисунке точка  $S'$  является мнимым изображением точки  $S$ .

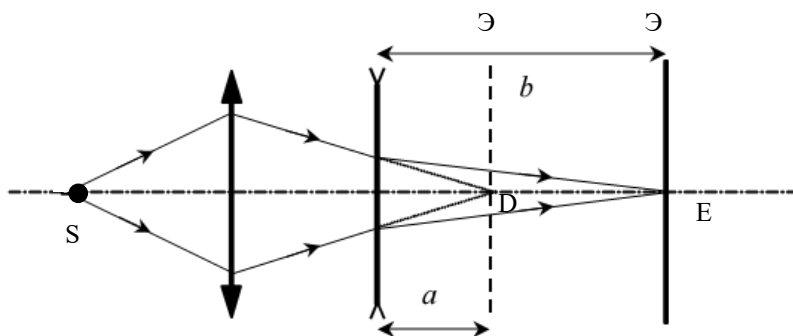


Рис. 7.1. Схема определения фокусного расстояния рассеивающей линзы

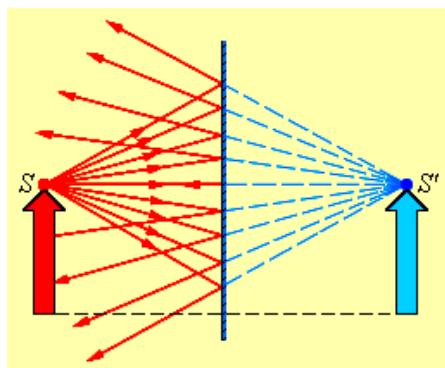


Рис. 8. Ход лучей при отражении от плоского зеркала

Вследствие закона отражения света мнимое изображение предмета располагается симметрично относительно зеркальной поверхности. Размер изображения равен размеру самого предмета.

Сферическим зеркалом называют зеркально отражающую поверхность, имеющую форму сферического сегмента. Центр сферы, из которой вырезан сегмент, называют оптическим центром зеркала. Вершину сферического сегмента называют полюсом. Прямая, проходящая через оптический центр и полюс зеркала, называется главной оптической осью сферического зеркала. Главная оптическая ось выделена из всех других прямых, проходящих через оптический центр, только тем, что она является осью симметрии зеркала.

Сферические зеркала бывают вогнутыми и выпуклыми. Если на вогнутое сферическое зеркало падает пучок лучей, параллельный главной оптической оси, то после отражения от зеркала лучи пересекутся в точке, которая называется главным фокусом  $F$  зеркала. Расстояние от фокуса до полюса зеркала называют фокусным расстоянием и обозначают той же буквой  $F$ . У вогнутого сферического зеркала главный фокус действительный. Он расположен посередине между центром и полюсом зеркала (рис. 9).

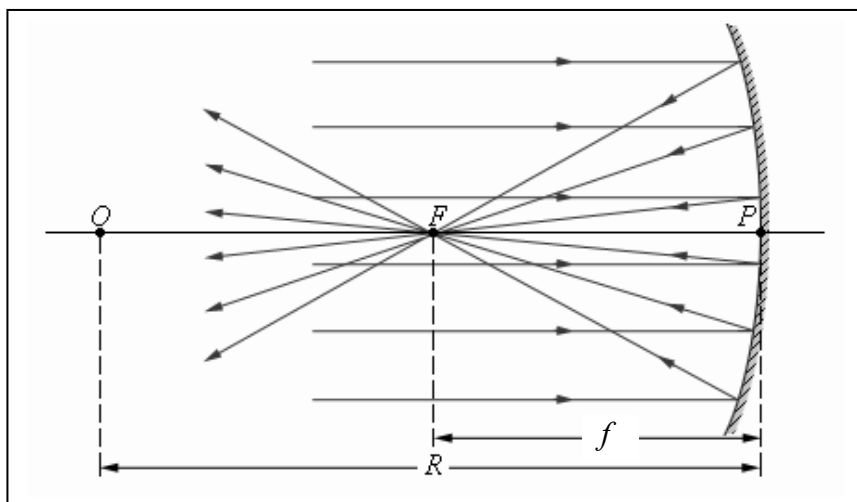


Рис. 9. Главный фокус вогнутого сферического зеркала

На рисунке 9 точка  $O$  – оптический центр,  $P$  – полюс,  $f$  – главный фокус зеркала;  $OP$  – главная оптическая ось,  $R$  – радиус кривизны зеркала.

Главный фокус выпуклого зеркала является мнимым. Если на выпуклое зеркало падает пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то после отражения в фокусе пересекутся не сами лучи, а их продолжения (рис. 10). На рисунке 10 точка  $F$  – мнимый фокус зеркала,  $O$  – оптический центр;  $OP$  – главная оптическая ось

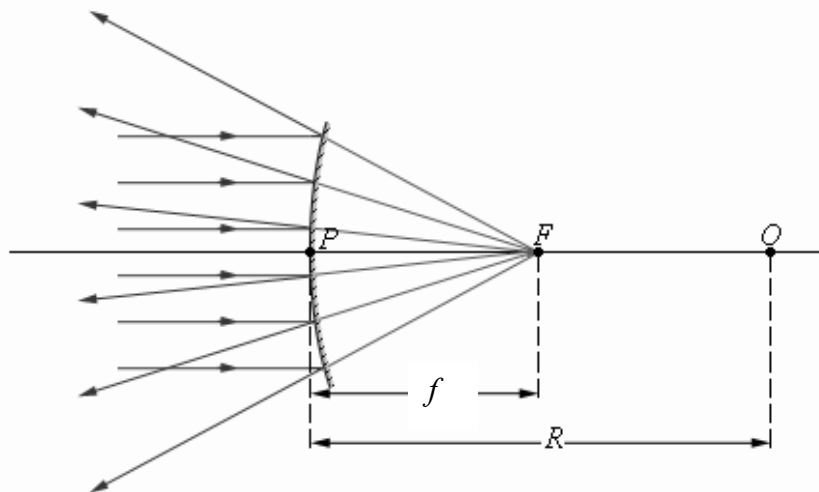


Рис. 10. Мнимый фокус выпуклого сферического зеркала

Фокусным расстояниям сферических зеркал приписывается определенный знак:

для вогнутого зеркала  $R = 2 \cdot f$

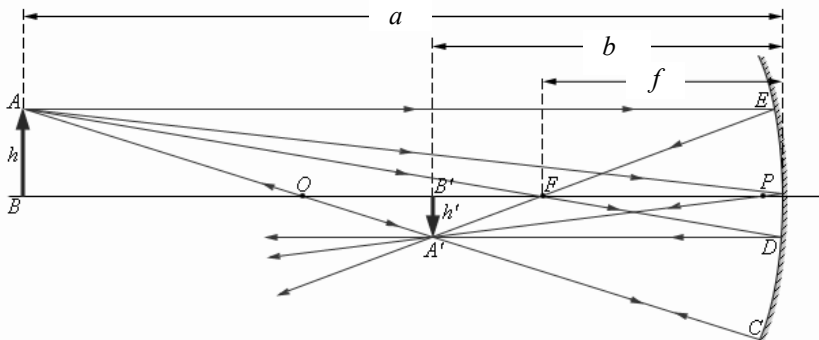
для выпуклого зеркала  $R = -2 \cdot f$ ,

где  $R$  – радиус кривизны зеркала.

Изображение какой-либо точки  $A$  предмета в сферическом зеркале можно построить с помощью любой пары стандартных лучей:

- луч AOC, проходящий через оптический центр зеркала; отраженный луч COA идет по той же прямой;
- луч AFD, идущий через фокус зеркала; отраженный луч идет параллельно главной оптической оси;
- луч AP, падающий на зеркало в его полюсе; отраженный луч симметричен с падающим относительно главной оптической оси.
- луч AE, параллельный главной оптической оси; отраженный луч EFA<sub>1</sub> проходит через фокус зеркала.

На рис. 11 показан ход базовых лучей в вогнутом сферическом зеркале. Все эти лучи проходят через точку A', которая является изображением точки A. Все остальные отраженные лучи также проходят через точку A'. Ход лучей, при котором все лучи, вышедшие из одной точки, собираются в другой точке, называется стигматическим. Отрезок A'B' является изображением предмета AB. Аналогичны построения для случая выпуклого зеркала.



**Рис. 11.** Построение изображения в вогнутом сферическом зеркале

Положение изображения и его размер можно также определить с помощью формулы сферического зеркала:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \quad (5)$$

Здесь  $a$  – расстояние от предмета до зеркала,  $b$  – расстояние от зеркала до изображения. Величины  $a$  и  $b$  подчиняются определенному правилу знаков:

Если  $a > 0$  и  $b > 0$ , то предмет и изображение действительные;

Если  $a < 0$  и  $b < 0$ , то предмет и изображение мнимые.

Для случая, изображенного на рис. 11, имеем:  $f > 0$ , так как зеркало вогнутое;  $a = 3f > 0$  – предмет действительный. По формуле сферического зеркала получаем  $b = 3/2f > 0$ . Следовательно, изображение тоже действительное.

Если бы на месте вогнутого зеркала стояло выпуклое зеркало с тем же по модулю фокусным расстоянием, мы получили бы следующий результат:  $f < 0$ ,  $a = -3f > 0$ ,  $b = 3/4f < 0$  – изображение мнимое.

Линейное увеличение сферического зеркала  $\Gamma$  определяется как отношение линейных размеров изображения  $h'$  и предмета  $h$ .

Величине  $h'$  удобно приписывать определенный знак в зависимости от того, является изображение прямым ( $h' > 0$ ) или перевернутым ( $h' < 0$ ). Величина  $h$  всегда считается положительной. При таком определении линейное увеличение сферического зеркала выражается формулой, которую можно легко получить из рис.11:

$$\Gamma = \frac{h'}{h} = \frac{b}{a} \quad (6)$$

В первом из рассмотренных выше примеров  $\Gamma = -1/2$  – следовательно, изображение перевернутое, уменьшенное в 2 раза. Во втором примере  $\Gamma = 1/4$  – изображение прямое, уменьшенное в 4 раза.

## ХОД РАБОТЫ

### А. Собирающая линза

1. Расположить приборы на оптической скамье, как показано на рис. 7, без рассеивающей линзы. Экран поместить на достаточно большом расстоянии от осветителя.

2. Перемещая собирающую линзу, найти положение отчетливого изображения предмета  $AB$  на экране и отсчитывают величины « $a$ » и « $b$ ».

3. Меняя положение экрана и линзы, повторить измерения пять раз.

4. Подставляя в формулу  $f = \frac{ab}{a+b}$  величины  $a$  и  $b$ , найти  $f_1, f_2, f_3$ .

5. Полученные результаты занести в таблицу.

## Б. Рассеивающая линза

1. Собрать схему как в первом случае для выпуклой линзы (рис. 7).

2. Зафиксировать точку  $D$  (положение экрана), когда получится резкое и четкое изображение предмета (рис. 7.1).

3. Между собирающей линзой  $L$  и точкой  $D$  поместить рассеивающую линзу  $L_2$ . Снова добиться резкого изображения на экране. Изображение из точки  $D$  перейдет в точку  $E$ . Для линзы  $L_2$  «предметом» является изображение в точке  $D$ , даваемое линзой  $L$  от предмета  $A$ . Пользуясь обратимостью хода лучей в системе линз можно рассматривать эти лучи света как распространяющиеся из точки  $E$ . Тогда точка  $D$  будет мнимым изображением точки  $E$ . (после преломления лучей в линзе  $L_2$ ). Следовательно, расстояние  $EA=a$ ,  $DA'=b$ .

4. Найденные значения подставить в формулу:

$$f = \frac{ab}{a-b}.$$

5. Все полученные в опыте и вычисленные результаты внести в таблицу такую же, как и для выпуклой линзы.

## Определение фокусного расстояния и радиуса кривизны вогнутого сферического зеркала

Для определения фокусного расстояния вогнутого сферического зеркала пользуются выражением  $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ , где  $a$  – расстояние от предмета (диапозитива) до зеркала,  $b$  – расстояние от зеркала до изображения;  $f$  – фокусное расстояние зеркала.

Фокусное расстояние вогнутого сферического зеркала связано с радиусом кривизны зеркал соотношением:

$$f = \frac{1}{2}R$$

1. Расположить небольшой экран на оптической скамье между зеркалом и осветителем с диапозитивом.

2. Перемещая зеркало (либо экран) найти положение отчетливого изображения диапозитива на экране и измерить величины  $b$  и  $f$ .

3. Меняя положение экрана и зеркала, повторить измерения не менее пяти раз.

4. Вычислить фокусное расстояние зеркала.

5. Занести в таблицу все полученные опытом и вычислением результаты.

6. Зная фокусное расстояние зеркала можно вычислить его радиус кривизны:

$$R = 2f .$$

**Таблица 1**

	№ п/п	Данные наблюдений		Результаты вычислений					
		a, м	b, м	f, м	f <sub>ср</sub> , м.	Δf, м	Δf <sub>ср</sub> , м	Δf <sub>ср</sub> /f <sub>ср</sub> . *100%	R, м
Собирающая линза	1								
	2								
	3								
Рассеивающая линза	1								
	2								
	3								
Сферическое зеркало	1								
	2								
	3								

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА

1. Дайте определение тонкой линзы, фокуса линзы, фокальной плоскости линзы, главной оптической оси, побочной оптической оси, оптического центра линзы, оптической силы линзы.

2. Изобразите на рисунке фокус линзы, фокальную плоскость линзы, главную оптическую ось, побочную оптическую ось, оптический центр линзы.

3. Какие изображения называют действительными и мнимыми, прямыми и обратными?

4. Запишите и объясните формулы для определения фокусного расстояния собирающей линзы, рассеивающей линзы и сферического зеркала.

5. Занести в таблицу все, полученные опытом и вычислением, результаты.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От чего зависит фокус линзы?
2. Сформулируйте правило построения изображения в линзах.

Приведите примеры построения изображений предмета.

3. Сформулируйте правило построения изображения в зеркалах. Приведите примеры построения изображений предмета.
4. Что такое линейное увеличение линзы?

## Лабораторная работа № 4.02

### Тема: ОПРЕДЕЛЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ И ХРОМАТИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИЙ ЛИНЗ

**Цель работы:** изучить сферическую aberrацию линзы при прохождении через нее широкого светового потока. Вычислить величину продольной сферической aberrации. Изучить хроматическую aberrацию в видимой части спектра.

**Приборы и принадлежности:** осветитель, линзы, экран, оптическая скамья.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Главным назначением любой оптической системы является получение четкого изображения объекта. Так, например, точечный объект дает точечное изображение, если рассматривать пучок параксиальных лучей, т.е. лучей, составляющих малые углы с оптической осью. Но при этом освещенность изображения уменьшается. Поэтому с практической точки зрения удобно пользоваться широкими пучками. Однако, в результате этого, изображение объекта приобретает ряд недостатков – **aberrаций**. Выделяют различные виды aberrаций по типу искажения изображений объектов. Основными являются сферическая и хроматическая aberrация, дисторсия, кома и астигматизм.

Устранение aberrаций возможно лишь подбором специально рассчитанных сложных оптических систем. Одновременное исправление всех погрешностей задача крайне сложная, а иногда даже неразрешимая. Поэтому обычно устраняются полностью лишь те погрешности, которые в том или ином случае особенно вредны.

**1. Сферическая aberrация.** Если расходящийся пучок света падает на линзу, то параксиальные лучи после преломления пересекаются в точке  $S'$  (на расстоянии  $OS'$  от оптического центра линзы), а краевые лучи, более удаленные от оптической оси, — в точке  $S''$ , ближе к линзе (рис. 1). В результате изображение светящейся точки на экране, перпендикулярном оптической оси, будет в виде расплывчатого пятна. Этот вид погрешности, связанный со сферичностью преломляющих поверхностей, называется сферической aberrацией. Количественной мерой

сферической aberrации является отрезок  $\delta = S''S'$ . Устранить или уменьшить сферическую aberrацию линзы можно, применяя различные диафрагмы. В этом случае на сферическую поверхность линзы будут падать практически параксиальные лучи, а не широкий пучок света. Однако при этом уменьшается светосила линзы. Сферическую aberrацию можно практически устранить, составляя системы из собирающих ( $\delta < 0$ ) и рассеивающих ( $\delta > 0$ ) линз. Сферическая aberrация является частным случаем астигматизма.

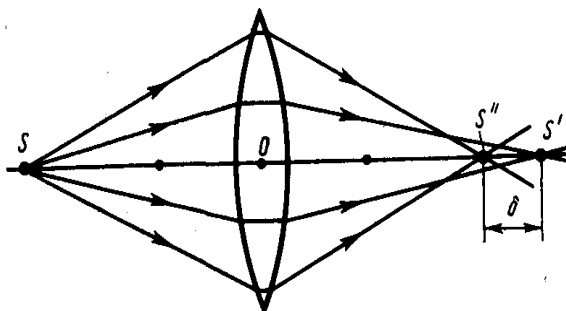


Рис. 1. Сферическая aberrация тонкой собирающей линзы

**2. Кома.** Если через оптическую систему проходит широкий пучок от светящейся точки, расположенной не на оптической оси, то получаемое изображение этой точки будет в виде освещенного пятнышка, напоминающего кометный хвост (рис. 2). Поэтому такая погрешность называется комой. Устранение комы производится теми же приемами, что и сферической aberrации.

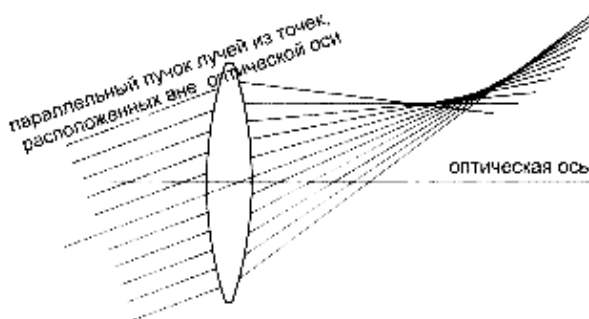
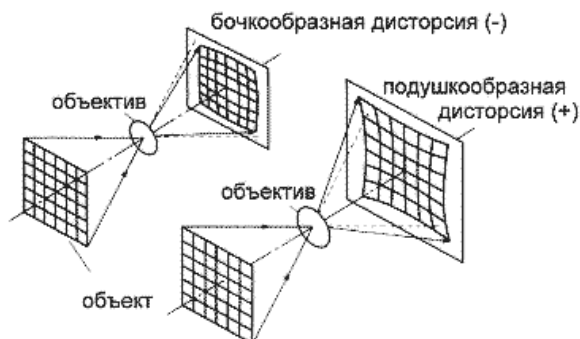


Рис. 2. Кома тонкой собирающей линзы

**3. Дисторсия.** Погрешность, при которой при больших углах падения лучей на линзу линейное увеличение для точек предмета, находящихся на разных расстояниях от главной оптической оси, несколько различается, называется дисторсией. В результате нарушается геометрическое подобие между предметом и его изображением (рис. 3). На рисунке представлены подушкообразная и бочкообразная дисторсии. Дисторсия особенно опасна в тех случаях, когда оптические системы применяются для съемок, например, при аэрофотосъемке, в микроскопии и т.д. Дисторсию исправляют соответствующим подбором составляющих частей оптической системы.



**Рис. 3.** Дисторсия оптической системы

**4. Хроматическая абберация.** При падении на оптическую систему немонахроматического света необходимо учитывать зависимость коэффициента преломления вещества линзы от длины волны, то есть явление дисперсии. При падении на оптическую систему белого света составляющие его монохроматические лучи фокусируются в разных точках (наибольшее фокусное расстояние имеют красные лучи, наименьшее – фиолетовые), поэтому изображение размыто и по краям окрашено (рис. 4). Это явление называется хроматической абберацией. Так как разные сорта стекол обладают различной дисперсией, то, комбинируя собирающие и рассеивающие линзы из различных стекол, можно совместить фокусы двух (**ахроматы**) и трех (**апохроматы**) различных цветов, устранив тем самым хроматическую абберацию. Системы, исправленные на сферическую и хроматическую абберации, называются **апланатами**.

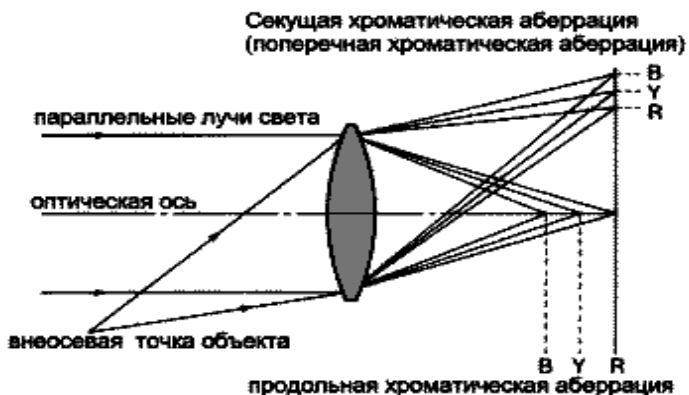


Рис. 4. Хроматическая aberrация тонкой собирающей линзы

5. **Астигматизм.** Погрешность, обусловленная неодинаковостью кривизны оптической поверхности в разных плоскостях сечения падающего на нее светового пучка, называется астигматизмом. Так, изображение точки, удаленной от главной оптической оси, наблюдается на экране в виде расплывчатого пятна эллиптической формы. Это пятно в зависимости от расстояния экрана до оптического центра линзы вырождается либо в вертикальную, либо в горизонтальную прямую. Астигматизм исправляется подбором радиусов кривизны преломляющих поверхностей и их фокусных расстояний. Системы, исправленные на сферическую и хроматическую aberrации и астигматизм, называются **анастигматами**.

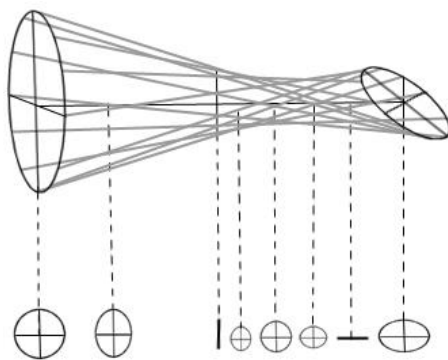


Рис. 5. Астигматизм оптической системы

## Методы наблюдения сферической аберрации и способы ее устранения

Возьмем двояковыпуклую линзу  $L$ . С помощью непрозрачного экрана  $AB$  с круглым отверстием (диафрагмой) выделим от точечного источника  $P$  параксиальные лучи (пучок). Пусть он пересекается в точке  $P'$  на расстоянии  $S'$  от линзы (рис. 6а).

Заменим теперь круглую диафрагму диафрагмой с кольцевым отверстием  $CD, EG$ , (рис. 6б). Эта диафрагма выделит от точечного источника  $P$  пучок краевых лучей, заключенных между конусами  $CPG, DPE$ . Краевые лучи сильнее преломляются в линзе и при прежнем положении источника  $P$  его изображение  $P''$  окажется от линзы на расстоянии  $S''$ , меньшим  $S'$ .

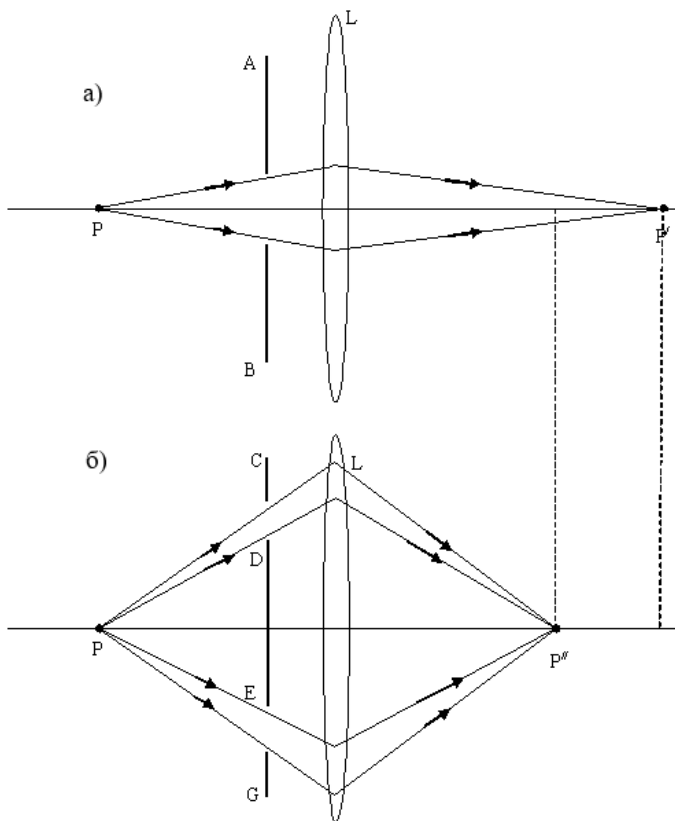


Рис. 6. Преломление: а) параксиальных и б) краевых лучей в тонкой линзе

Расстояние  $\delta S = S'' - S'$  называется продольной сферической aberrацией. Наличие продольной сферической aberrацией ведет к размытию изображения.

Для собирающей линзы продольная сферическая aberrация отрицательная, а для рассеивающих  $\Delta S > 0$ .

Это обстоятельство позволяет устранить сферическую aberrацию путем комбинирования собирающих и рассеивающих линз.

### **Методы наблюдения хроматической aberrации и способы ее устранения**

При освещении системы монохроматическим светом, фокусное расстояние линзы определяется соотношением:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где  $n$  - относительный показатель преломления  $R_1, R_2$  - радиусы кривизны поверхности линз.

При сложном составе света необходимо учитывать зависимость коэффициента преломления от длины волны (явление дисперсии света). В случае нормальной дисперсии с увеличением длины волны показатель преломления  $n$  уменьшается. Поэтому линза имеет большую оптическую силу для фиолетовых лучей, чем для красных.

Пусть от точечного источника  $P$  получается изображение с помощью одной положительной линзы. В этом случае изображение источника в фиолетовых лучах  $P_f$  будет расположено ближе всего к линзе, а в красных лучах  $P_k$  - дальше от линзы (рис. 7). Между ними будут находиться изображения, образованные лучами остальных цветов.

Хроматическую aberrацию можно исправить, комбинируя собирающие и рассеивающие линзы, сделанные из стекол, обладающих разными показателями преломления. Для наблюдения продольной сферической aberrации и определения фокусного расстояния линзы для красных и фиолетовых лучей собирают установку, состоящую из осветителя, линзы и экрана.

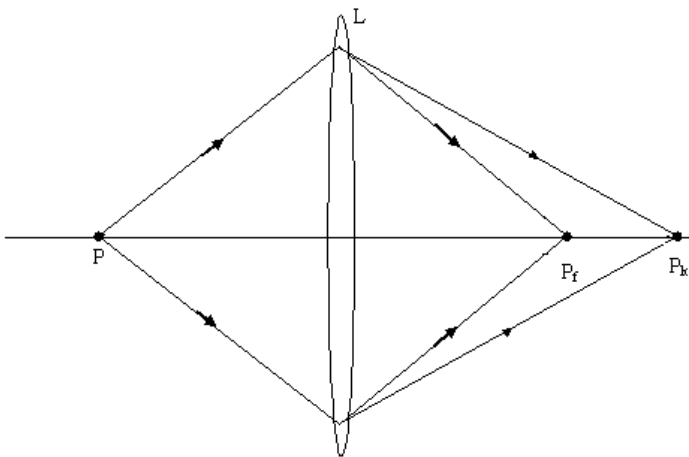


Рис. 7. Хроматическая aberrация

## Измерения и обработка результатов измерений

### А. Сферическая aberrация.

1. Поместить между источником и линзой круглую диафрагму. Получить резкое изображение источника (диапозитива) и зафиксировать положение экрана  $S'$ .

2. Расположить между источником и линзой кольцевую диафрагму. Получить резкое изображение источника и зафиксировать положение экрана  $S''$ .

3. Определить величину продольной сферической aberrации  $\delta S$ . Измерения проделать пять раз.

4. Результаты записать в таблицу №1.

### Б. Хроматическая aberrация.

1. Расположить между источником и линзой фиолетовый светофильтр и получить резкое изображение на экране.

2. Отметить положение экрана и рассчитать фокусное расстояние по формуле:

$$\frac{1}{f_f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b},$$

где  $a$  - расстояние от линзы до источника,

$b$  - расстояние от линзы до изображения на экране.

Измерения сделать пять раз.

3. Поместить между источником и линзой красный светофильтр и получить резкое изображение на экране.

4. Отметить положение экрана  $S_2$ , и найти фокусное расстояние  $f_2$  по формуле:

$$\frac{1}{f_k} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}.$$

Измерения произвести пять раз.

5. Результаты занести в таблицу № 2.

**Таблица 1**

N п/п	Данные наблюдений		Результаты вычислений			
	$S', м$	$S'', м$	$\delta S, м$	$\Delta \delta S, м$	$\frac{\Delta \delta S_{cp}}{\delta S_{cp}} 100\%$	$\delta S_{ист} = \delta S_{cp} \pm \Delta \delta S_{cp}$
1						
2						
3						
Среднее значение						

**Таблица 2**

N п/п	Данные наблюдений		Результаты вычислений			
	$a, м$	$b, м$	$f, м$	$\Delta f, м$	$\frac{\Delta f_{cp}}{f_{cp}} 100\%$	$f_{ист} = f_{cp} \pm \Delta f_{cp}$
Фиолетовые лучи	1					
	2					
	3					
	Среднее значение					
Красные лучи	1					
	2					
	3					
	Среднее значение					

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА

1. Что такое aberrация света?
2. В чем состоит явление продольной сферической и хроматической aberrации линз?
3. Дайте определения видам aberrаций: кома, дисторсия, астигматизм.
4. Запишите и объясните формулу для экспериментального определения продольной сферической aberrации.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Покажите ход лучей света в линзе при сферической aberrации.
2. Покажите ход лучей света в линзе при хроматической aberrации.
3. Перечислите методы устранения aberrаций оптических систем.
4. Что называют апланатами и анастигматами?

Тема: **ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСКОПА.  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ОБЪЕКТИВА.  
ИЗМЕРЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПРЕДМЕТА**

**Цель работы:** определение значения увеличения объектива микроскопа.

**Приборы и принадлежности:** микроскоп, микрометр окулярный, объект-микрометр, измеряемые предметы.

**КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**

**Микроскоп как центрированная  
оптическая система**

Микроскоп – оптическое устройство, состоящее из объектива, окуляра и осветительного приспособления. Микроскоп является центрированной оптической системой линз. Объектив микроскопа должен давать действительное, обратное и увеличенное изображение малых предметов. Поэтому рассматриваемый предмет АВ располагается немного дальше главного фокуса объектива, а объектив имеет небольшое фокусное расстояние (несколько миллиметров). Изображение  $A'B'$  предмета АВ получается за двойным фокусным расстоянием по другую сторону объектива. Объектив микроскопа представляет собой сложную систему линз, в которой устранены сферическая и хроматическая аберрации и прочие недостатки.

Увеличенное изображение  $A'B'$  предмета АВ рассматривается далее через окуляр, действующий как лупа. Окуляры микроскопов также имеют малые фокусные расстояния и собираются обычно по системе Гюйгенса. При рассмотрении через окуляр действительного изображения  $A'B'$  предмета, полученного от объектива, это изображение должно располагаться между окуляром и его главным фокусом весьма близко к фокальной плоскости окуляра. Расстояние между внутренними главными фокусами объектива и окуляра называется оптической длиной  $\Delta$  микроскопа.

Увеличение микроскопа можно рассчитать по увеличению объектива и окуляра. Увеличение объектива равно приблизительно отношению оптической длины  $\Delta$  микроскопа к главному фокусному расстоянию  $f_{об}$  объектива.

Увеличение окуляра, как и любой лупы, равно отношению ясного зрения (25 см) к главному фокусному расстоянию  $f_{ок}$  окуляра. Тогда увеличение микроскопа  $\gamma$  равно произведению увеличений объектива и окуляра:

$$\gamma = \frac{\Delta \cdot 25}{f_{об} \cdot f_{ок}} \quad (1)$$

### **Ход оптических лучей в микроскопе**

Ход оптический лучей в микроскопе подчиняется законам геометрической оптики: закону преломления световых лучей на границе раздела двух сред и закону прямолинейного распространения в однородной среде. Для построения хода лучей применяются следующие правила:

1. Луч проходящий через оптический центр не преломляется;
2. Краевые лучи преломляются сильнее других;
3. Плоскопараллельный пучок, падающий на систему линз собирается в ее главном фокусе;
4. Пучок исходящий из главного фокуса системы, становится плоскопараллельным.

На рис. 1 представлен ход лучей в микроскопе, основанный на законах и правилах, указанных выше.

**Закон прямолинейного распространения света** состоит в следующем: в однородной среде свет распространяется прямолинейно вдоль светового луча.

**Закон преломления (Снеллиуса)** можно сформулировать так: луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точку падения, лежат в одной плоскости. Причем отношение синуса угла падения  $\theta$  к синусу угла преломления  $\theta''$  равно отношению скоростей света в первой  $v_1$  и второй  $v_2$  средах соответственно.

Между скоростью света и оптической плотностью среды, в которой он распространяется существует обратная связь: чем больше оптическая плотность среды, тем меньше в ней скорость света.

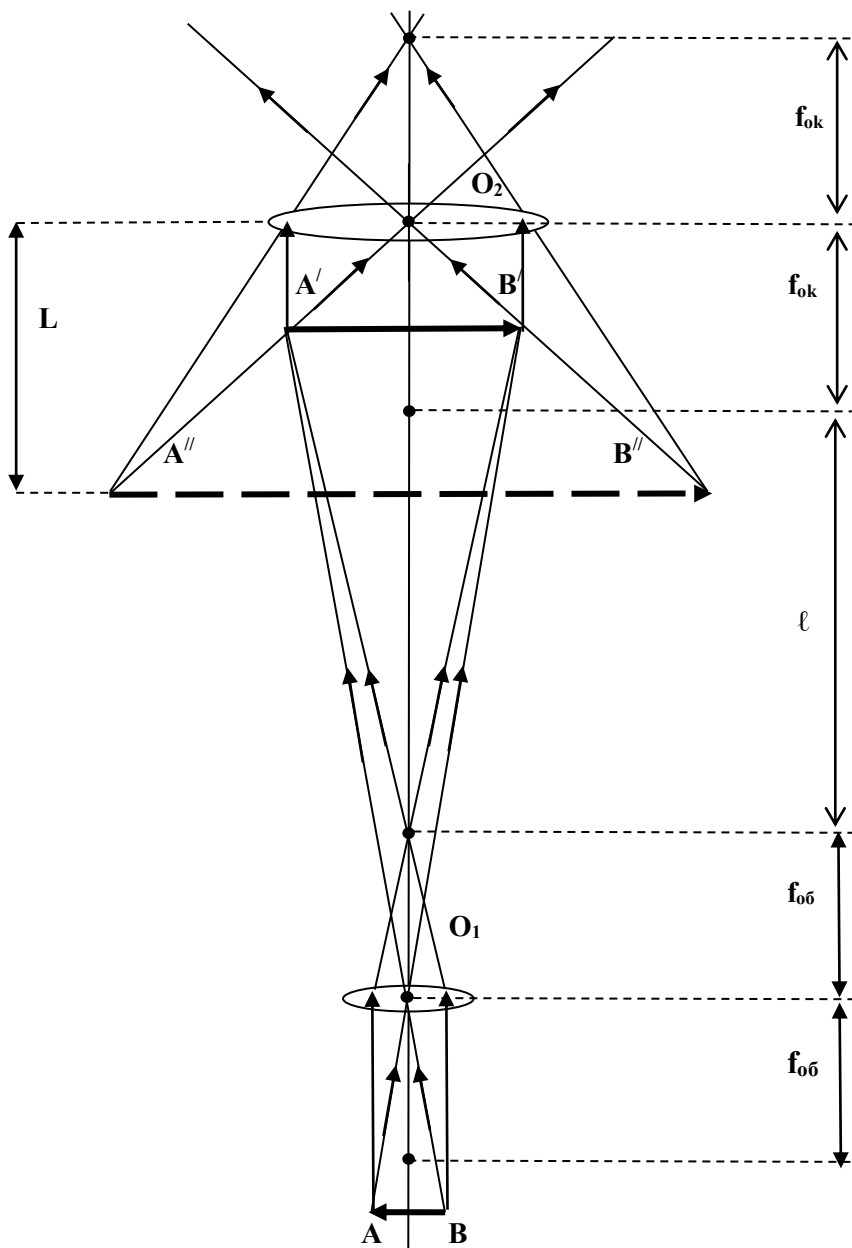


Рис. 1. Ход оптических лучей в микроскопе

Таким образом закон преломления с учетом сказанного можно записать в виде:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta''} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{12}, \quad (2)$$

где  $n_{12}$  - **относительный показатель преломления** света, который показывает, во сколько раз оптическая плотность второй среды отличается от оптической плотности первой.

### Полное устройство микроскопа

Микроскоп имеет достаточно сложное устройство, которое представлено на рис. 2. Основой любого микроскопа является центрированная оптическая система из объективов и окуляров. На объективах и окулярах принято указывать их увеличение. Для физических измерений употребляют микроскопы с увеличением в несколько сотен раз.

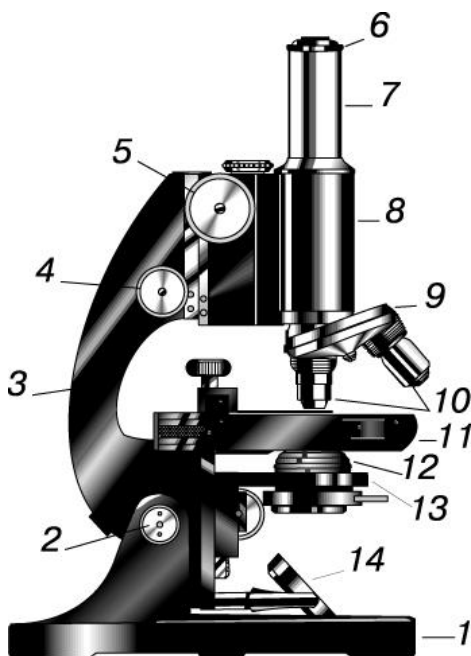


Рис. 2. Типичный микроскоп с одним окуляром и двумя сменными объективами на револьверной головке

Осветительное приспособление микроскопа состоит из зеркала, конденсора и диафрагмы. Зеркало направляет лучи от источника света вдоль оси микроскопа. Оно имеет две поверхности: плоскую и вогнутую. Вогнутая поверхность служит для усиления концентрации света на рассматриваемый объект и применяется, если не пользуются конденсором. Конденсор концентрирует свет, отраженный от плоского зеркала в сильно сходящийся пучок, направленный на рассматриваемый объект.

Диафрагма позволяет регулировать яркость рассматриваемого поля зрения.

Фокусировка микроскопа, т.е. установка его на отчетливость изображения производится перемещением тубуса микроскопа в целом относительно объекта.

Используемый в работе микроскоп, изображенный на рис.2. дает увеличение в пределах от 100 до 1000. Он состоит из следующих конструктивных элементов:

- 1 - штативная подставка; 2 - шарнир для наклона;
- 3 - тубусодержатель; 4 - ручка микрометрической регулировки;
- 5 - ручка грубой регулировки; 6 - окуляр;
- 7 - держатель окуляра; 8 - тубус;
- 9 - револьверная головка; 10 - объективы;
- 11 - предметный столик; 12 - конденсор;
- 13 - нижний держатель; 14 - зеркало.

### **Основные характеристики микроскопа**

К основным характеристикам микроскопа как оптического устройства относятся: разрешающая способность и апертура. Обе характеристики определяют качество и четкость, получаемого изображения.

**Разрешающей способностью микроскопа** называют способность различать две близкорасположенные точки на объекте, которые изображаются как отдельные. На разрешающую способность влияют длины волны и значения числовой апертуры микроскопа. Для повышения разрешающей способности микроскопа либо увеличивают апертуру объектива, например, заполнив пространство между рассматриваемым предметом и объективом иммерсионной жидкостью, либо уменьшают длину волны света, падающего на объект. Для увеличения разрешающей способности можно использовать ультрафиолетовые лучи.

Разрешающая сила объектива зависит от его диаметра и может быть найдена по формуле:

$$R = \frac{1}{\delta\varphi} = \frac{D}{1,22 \cdot \lambda}, \quad (3)$$

где  $D$  - диаметр объектива, а  $\delta\varphi$  - наименьшее угловое расстояние разрешаемое объективом.

Апертура микроскопа характеризует способность собирать свет и препятствовать дифракционному размытию мелких деталей изображения. Она связана с диаметром объектива и определяет его разрешающую способность. Апертура бывает угловой и числовой.

**Угловой апертурой называют** максимальный угол, под которым могут попадать в объектив лучи, прошедшие через объект.

**Числовая апертура объектива** определяется произведением синуса половины угловой апертуры на показатель преломления среды, находящейся между предметным стеклом и фронтальной линзой объектива:

$$A = n \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

где,  $A$  - числовая апертура;  $n$  - показатель преломления среды между препаратом и объективом;  $\alpha$  – половина угловой апертуры.

Способ измерения апертуры зависит от расположения изображения: если оно удалённое (как у телескопа, лупы или проектора), то апертуру измеряют в линейном виде. В этом случае она соответствует диаметру светового пучка на выходе из оптической системы, в зоне так называемого выходного зрачка; если оно близкое (как у фотообъектива), то апертура соответствует углу сходимости световых пучков.

## ХОД РАБОТЫ

### I. Определение увеличения объектива

1. Ознакомиться с устройством микроскопа.
2. Привести микроскоп в рабочее положение.
3. Положить на столик микроскопа объект-микрометр и сфокусировать микроскоп на ясное видение сетки.
4. Наблюдая в окуляр, вращением барабана окулярного микрометра, совместить центр перекрестия (или биштрихи) с одной из

линий объекта-микрометра. Снять отсчет  $t_1$  по шкалам окулярного микрометра.

5. Продолжая наблюдать в окуляр, вращением барабана переместить центр перекрестия (или биштрихи) на  $Z$  делений сетки и снять отсчет  $t_2$  по шкалам окулярного микрометра.

6. Все измерения произвести три раза. Данные занести в таблицу 1.

7. Рассчитать линейное увеличение объектива по формуле:

$$\beta = \frac{t_1 - t_2}{Z * a}, \quad (5)$$

где  $\beta$  - линейное увеличение объектива,

$t_1 - t_2$  - разность двух отсчетов по шкалам окулярного микрометра,

$Z$  - число делений объекта-микрометра,

$a = 0.1$  мм - цена деления объекта-микрометра,  $0.01$  мм - цена деления шкалы барабана микрометрического винта.

Неподвижная шкала в поле зрения служит для отсчета полных оборотов барабана винта, т.е. целых миллиметров.

## II. Измерение величины объектов

1. Со столика микроскопа снять объект-микрометр и на его место поместить измеряемый объект (проволоку).

2. Тубус микроскопа сфокусировать на резкое изображение объекта (проволоки).

3. Наблюдая в окуляр и вращая барабан окулярного микрометра провести центр перекрестия (или биштрихи) до совмещения с левым краем объекта (проволоки).

4. По шкалам микрометра сделать  $t_1$  отсчет.

5. Подвести перекрестие (или биштрихи) до совмещения с изображением правого края объекта (проволоки).

6. По шкалам микрометра сделать  $t_2$  отсчет.

7. Величину объекта (толщину проволоки) рассчитать по формуле:

$$t = \frac{t_1 - t_2}{\beta_{cp}}, \quad (6)$$

где  $\beta_{cp}$  - среднее значение увеличения объектива.

8. Все измерения произвести три раза. Данные занести в таблицу № 2.

**Таблица 1**

№ измерения	Данные наблюдений				Результаты вычислений		
	$t_1, м$	$t_2, м$	$t_1 - t_2, м$	$z$	$\beta$	$\Delta\beta$	$\varepsilon, \%$
1							
2							
3							
Среднее значение							

**Таблица 2**

№ измерения	Данные наблюдений			Результаты вычислений		
	$t_1, м$	$t_2, м$	$t_1 - t_2, м$	$t, м$	$\Delta t, м$	$\varepsilon, \%$
1						
2						
3						
Среднее значение						

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА

1. Устройство микроскопа и его применение.
2. Сформулируйте законы геометрической оптики, на которых основан ход лучей в микроскопе.
3. Объясните ход лучей в микроскопе.
4. Как происходит увеличение объекта в оптическом микроскопе?

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите формулу для увеличения микроскопа.
2. Что такое разрешающая способность микроскопа?
3. Что ограничивает разрешающую способность микроскопа и как ее увеличить?
4. Апертура объектива и способы ее изменения.

## Лабораторная работа № 4.04

### Тема: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА С ПОМОЩЬЮ МИКРОСКОПА

**Цель работы:** Определить показатель преломления стекла с помощью микроскопа.

**Приборы и принадлежности:** измерительный микрометр, стеклянная пластинка со штрихами на обеих поверхностях, микроскоп с микрометрическим винтом.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

При падении светового луча на границу раздела двух сред, происходит его расщепление на отраженный и преломленный лучи (рис. 1). При этом энергия падающего света распределяется между отраженным и преломленным световыми лучами в зависимости от относительного показателя преломления  $n_{21}$  на границе раздела сред:

$$E_{\text{пад}} = E_{\text{отр}} + E_{\text{пр}} \quad (1)$$

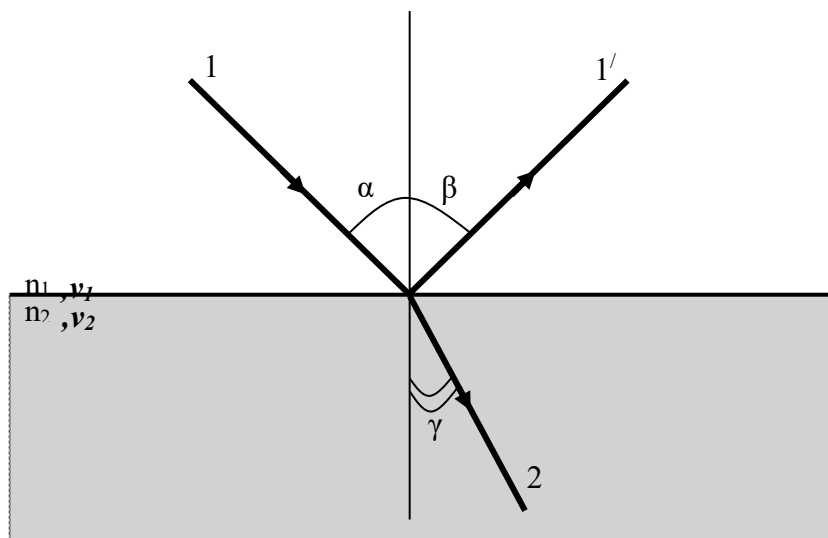
где  $E_{\text{пад}}$  – энергия падающего излучения,  $E_{\text{отр}}$  – энергия отраженного,  $E_{\text{пр}}$  – энергия преломленного.

Абсолютный показатель преломления - это безразмерная физическая величина равная отношению скорости света в вакууме (воздухе)  $c$  к скорости света в данной среде  $v$  :

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

Принципа Эйнштейна, содержит утверждение, что не существует скорости большей скорости света в вакууме (второй постулат специальной теории относительности). Исходя из него и формулы (2) следует, что  $n \geq 1$  всегда.

К основным законам геометрической оптики относятся законы отражения и преломления света. Которые формулируются следующим образом.



**Рис. 1.** Отражение и преломление световых лучей на границе раздела сред

**Закон отражения:** луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точку падения, лежат в одной плоскости (рис. 1). Причем угол отражения равен углу падения:

$$\angle \alpha = \angle \beta \quad (3)$$

**Закон преломления:** луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точку падения, лежат в одной плоскости (рис. 1). Причем отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению скоростей света в первой и второй средах соответственно:

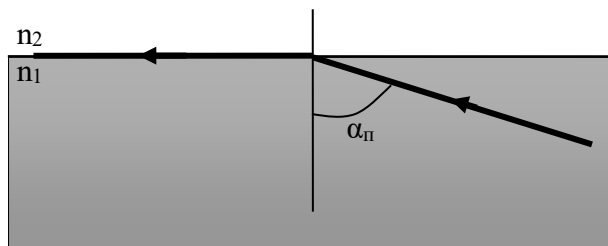
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} \quad (4)$$

Чем больше оптическая плотность среды, тем меньше скорость распространения света в ней, то есть между показателем преломления среды и скоростью распространения света существует обратная связь:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (5)$$

где  $n_{21}$  - **относительный показатель преломления** света, который показывает, во сколько раз оптическая плотность второй среды отличается от оптической плотности первой.

Существуют такие границы раздела сред, для которых свет при падении под определенным углом не преломляется. Это явление называется явлением **полного внутреннего отражения (ПВО)** (см. рис. 2).



**Рис. 2.** Явление полного внутреннего отражения

Оно возникает тогда, когда первая среда оптически плотнее, чем вторая ( $n_1 > n_2$ ). Углы падения, при которых наблюдается явление ПВО, определяются из предыдущих соотношений:

$$\sin \alpha_{np} = \frac{n_2}{n_1} < 1, \quad (6)$$

где  $\alpha_{np} < \alpha < \frac{\pi}{2}$ .

В данной работе абсолютный показатель преломления стекла определяется с помощью микроскопа.

**Микроскоп** - это оптический прибор, состоящий из системы линз, который служит для получения увеличенных изображений объектов, невидимых невооруженным глазом. Микроскоп представляет собой центрированную оптическую систему, состоящую из двух основных частей окуляра и объектива. Одна система линз, называемая объективом, подводится близко к образцу; она создает увеличенное и разрешенное изображение объекта. Изображение далее увеличивается другой системой линз, называемой окуляром и помещающейся ближе к глазу наблю-

дателя. Эти две системы линз расположены на противоположных концах тубуса.

**Оптическая система** называется **центрированной**, если она образована сферическими поверхностями, центры которых лежат на одной прямой. Такая прямая называется **оптической осью системы**.

Оптическая система, как и простая линза, делит пространство на две части: **пространство предметов** – до входа лучей в оптическую систему, **пространство изображений** – после выхода лучей из оптической системы.

Точка, в которой сходится плоскопараллельный пучок, прошедший через оптическую систему, называется **задним фокусом  $F'$** . Плоскость, которая проходит через задний фокус перпендикулярно оптической оси, называется **задней фокальной плоскостью**. Точка на оптической оси, в которую нужно поместить точечный источник так, чтобы прошедший через оптическую систему пучок оказался плоскопараллельным, называется **передним фокусом  $F$** . Плоскость, которая проходит через передний фокус перпендикулярно оптической оси, называется **передней фокальной плоскостью**.

Предмет и его изображение лежат в одной плоскости. Если предмет и изображение лежат по одну сторону от оптической оси, то изображение предмета является **прямым**, если по разные стороны – **обратным**.

Отношение линейных размеров изображения  $y'$  и предмета  $y$  называется **линейным** или **поперечным увеличением  $\beta$** :

$$\beta = \frac{y'}{y} \quad (7)$$

Если  $\beta > 0$ , то изображение **увеличенное**; если  $\beta < 0$ , то изображение **уменьшенное**.

Для всякой оптической системы существуют две сопряженные плоскости, которые отображают друг друга с линейным увеличением  $\beta = +1$ . Эти плоскости называются **главными**. **Главная плоскость** в пространстве предмета называется **передней**, в пространстве изображений – **задней**. Точки на пересечении главных плоскостей с оптической осью называют **главными точками ( $H$  – передняя,  $H'$  – задняя)**.

**Узловыми точками** или **узлами** называются лежащие на оптической оси сопряженные точки  $N$  и  $N'$  такие, что проходящие через них сопряженные лучи параллельны между собой. Перпендикулярные к оси плоскости, проходящие через узлы, называются **узловыми плоскостями**. Расстояние между узлами всегда равно расстоянию между главными точками. Если по обе стороны от оптической системы показатель сред одинаков, то узлы и главные точки совпадают.

Расстояние  $HF$  называют **передним фокусным расстоянием**  $f$  системы, а  $H'F'$  - **задним фокусным расстоянием**  $f'$ . Если по обе стороны от оптической системы показатель сред одинаков, то  $f' = -f$ . Если среды разные, то связь между фокусными расстояниями выражается формулой:

$$\frac{f}{f'} = -\frac{n}{n'} \quad (8)$$

где  $n$  - показатель преломления среды в которой находится объект, а  $n'$  - показатель среды где образуется изображение.

Важной оптической характеристикой является **оптическая сила**  $D$ , которая измеряется в диоптриях (дптр). Она численно равна отношению показателя преломления среды к фокусному расстоянию в этой среде:

$$D = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f} \quad (9)$$

Фокусное расстояние для определения оптической силы берется в метрах.

При положительной оптической силе  $D$  заднее фокусное расстояние  $f'$  – положительно. Следовательно, система дает действительное изображение бесконечно удаленной точки – параллельный пучок превращается в сходящийся. Такая система называется **собирающей**.

При отрицательной оптической силе  $D$  заднее фокусное расстояние  $f'$  – отрицательно. Следовательно, система дает мнимое изображение бесконечно удаленной точки – параллельный пучок превращается в расходящийся. Такая система называется **рассеивающей**.

Всякое оптическое изображение, даваемое оптической системой можно получить, зная расположение кардинальных

плоскостей и точек и используя хотя бы два из трех основных лучей:

1. плоскопараллельный луч, проходящий через соответствующую точку предмета (в задней плоскости оптической системы он пройдет через задний фокус линзы  $F'$ );

2. луч, проходящий через точку предмета и оптический центр линзы (лучи проходящие через оптический центр не искажаются);

3. луч, проходящий через точку предмета и передний фокус оптической системы (в задней плоскости оптической системы он пойдет параллельно оптической оси).

На пересечении вышеперечисленных лучей получается изображение той или иной точки предмета.

Формула оптической центрированной системы имеет вид:

$$\frac{1}{s} - \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (10)$$

где  $s$  - расстояние от передней главной плоскости до предмета, а  $s'$  - расстояние от задней главной плоскости до изображения в оптической центрированной системе.

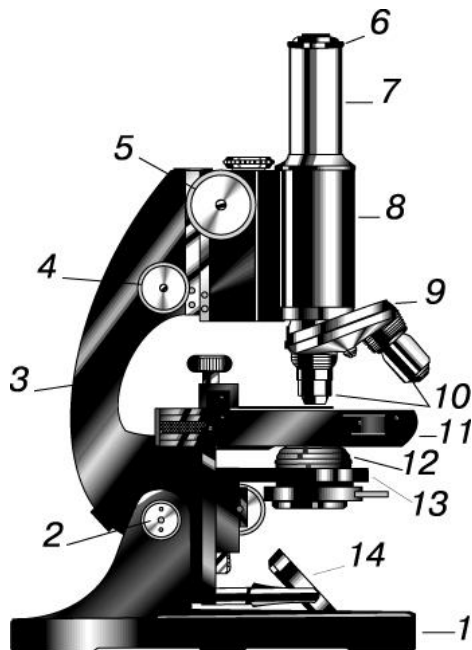
Ниже на рисунке 3 представлен типичный микроскоп с указанием его основных частей.

В основе метода определения показателя преломления стеклянной пластинки лежит явление кажущегося уменьшения толщины стеклянной пластинки вследствие преломления световых лучей, проходящих в стекле при рассматривании пластинки нормально к ее поверхности. Схема прохождения лучей через пластинку дана на рис. 4.

В точку  $A$ , на нижней поверхности пластинки, падают два луча света  $1$  и  $2$ . Луч  $2$  падает на пластинку нормально к её поверхности и поэтому проходит сквозь пластинку и выходит в воздух в точке  $C$ , не испытывая преломления. Луч  $1$  преломляется и выходит из пластинки в точке  $O$  по направлению к точке  $D$ .

При выходе из пластинки луч  $OD$  образует угол преломления  $r$  больший, чем угол падения  $i$ . Если смотреть из точки  $D$  по направлению  $DO$ , то наблюдатель будет видеть точку пересечения лучей  $OD$ ,  $AC$  не в точке  $A$ , а в точке  $E$ , т.е. толщина пластинки будет казаться равной  $CE$ .

Из рисунка видно, что кажущаяся толщина пластинки  $CE=h$  меньше истинной, т.е. действительной её толщины  $CA=H$ .



**Рис. 3.** Типичный микроскоп с одним окуляром и двумя сменными объективами на револьверной головке

*Увеличение в пределах от 100 до 1000. 1 - штативная подставка; 2 - шарнир для наклона; 3 - тубусодержатель; 4 - ручка микрометрической регулировки; 5 - ручка грубой регулировки; 6 - окуляр; 7 - держатель окуляра; 8 - тубус; 9 - револьверная головка; 10 - объективы; 11 - предметный столик; 12 - конденсор; 13 - нижний держатель; 14 - зеркало.*

Для лучей близких к нормально падающим лучам, углы падения и преломления малы. В этом случае синусы можно заменить тангенсами и, согласно закону преломления света, написать (рассматривая обратный ход лучей, т.е. от **D** к **A**)

$$n_{21} = \frac{\sin r}{\sin i} = \frac{\operatorname{tgr}}{\operatorname{tgi}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (11)$$

Так как по условию среда 1 вакуум, то  $n_1=1$ , а  $n_{21}=n_2$  и соответствует показателю преломления стекла  $n$

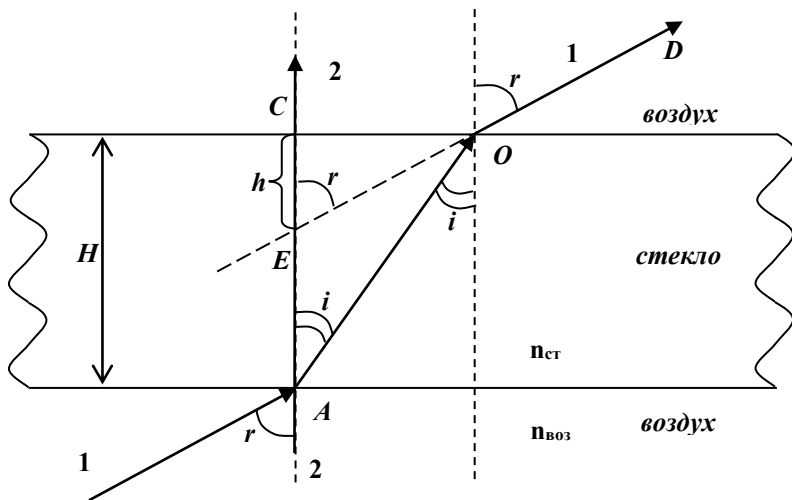


Рис. 4. Ход лучей через плоскопараллельную пластинку

При рассмотрении рисунка и после соответствующих преобразований имеем:

$$n = n_{21} = \frac{\operatorname{tgr}}{\operatorname{tgi}} = \frac{CO}{h} \cdot \frac{H}{CO} = \frac{H}{h}. \quad (12)$$

Следовательно, показатель преломления стекла можно найти из отношения истинной толщины стеклянной пластинки  $H$  к кажущейся её толщине  $h$ . Истинная толщина пластинки измеряется микрометром, а кажущаяся – микроскопом с микрометрическим винтом.

## ХОД РАБОТЫ

1. Измерить микрометром истинную толщину стеклянной пластинки  $H$  в том месте, где нанесены штрихи, и взять её значения в миллиметрах.

2. Определить кажущуюся толщину стеклянной пластинки  $h$ . Для этого пластинку необходимо положить на столик микроскопа под объектив так, чтобы оба штриха пересекали оптическую ось прибора.

3. Затем, двигая тубус, добиться чёткого изображения видимого в микроскоп штриха, нанесённого на верхнюю поверхность пластинки. Записать отсчёт микрометрического винта и считать его за 0 деление.

4. Опустить тубус микроскопа до получения чёткого изображения штриха, на нижней поверхности пластинки. Новый отсчёт микрометрического винта даёт сразу кажущуюся толщину  $h$ .

5. Очевидно  $h = (NZ + 0,002m)$  мм, где  $N$  – число полных оборотов барабана винта,  $Z=0,002*50$  – шаг винта,  $50$  – число делений на одном обороте барабана,  $0,002$  – цена одного деления барабана винта,  $m$  – число делений в неполном обороте барабана. За один полный оборот барабана микрометрического винта тубус микроскопа перемещается на  $Z = 0,1$  мм.

3. Вычислить показатель преломления стекла по формуле:

$$n = \frac{H}{h}.$$

4. Измерения произвести не менее трёх раз. Все данные внести в таблицу.

Таблица

		Данные наблюдений				Результаты вычислений		
№	$H, мм$	$N$	$m$	$h, мм$	$n$	$\Delta n$	$\varepsilon, \%$	
1.								
2.								
3.								
Среднее значение								
1.								
2.								
3.								
Среднее значение								
1.								
2.								
3.								
Среднее значение								

## ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА

1. Дать определение абсолютного и относительного показателя преломления. От чего они зависят?
2. Сформулируйте и запишите закон отражения света. Рисунок.
3. Сформулируйте и запишите закон преломления света. Рисунок.
4. Записать и объяснить формулу для расчета оптической силы центрированной оптической системы.
5. Чему равно линейное поперечное увеличение объекта для центрированной оптической системы?
6. При каком условии узловые и главные точки совпадут?

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. При каких условиях наблюдается полное внутреннее отражение.
2. Сформулируйте закон полного внутреннего отражения света.
3. В чем заключается суть метода измерения толщины пластинки с помощью микроскопа?
4. Как строится изображение в центрированной оптической системе?
5. Получите, используя закон преломления, соотношение (12).
6. Объясните ход лучей в плоскопараллельной стеклянной пластике (рис. 4).

## Лабораторная работа № 4.05

### Тема: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

**Цель работы:** определение длины волны света на основе интерференции световых пучков, образованных бипризмой Френеля.

**Приборы и принадлежности:** бипризма Френеля, оптическая щель, осветитель, отсчетный микроскоп, тонкая линза с фокусным расстоянием 10-15 см, матовый экран, набор светофильтров, оптическая скамья, масштабная линейка.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

**Интерференцией** называют суперпозицию когерентных волн, которая приводит к перераспределению интенсивности светового потока. Явление интерференции имеет волновую природу. Интерференция наблюдается при суперпозиции света от **дискретных когерентных источников**.

**Когерентными** называют волны (и их источники), длины волн (частоты) которых совпадают и разность хода (фаз) волн является постоянной.

**Разностью хода**  $\Delta$  двух произвольных лучей называют величину равную разности их оптических длин пути ( $L_1$  и  $L_2$ ). Она определяется соотношением:

$$\Delta = L_1 - L_2 = n_1 s_1 - n_2 s_2 \quad (1)$$

Вместо разности хода иногда используют понятие разности фаз  $\delta$ . Они связаны по формуле:

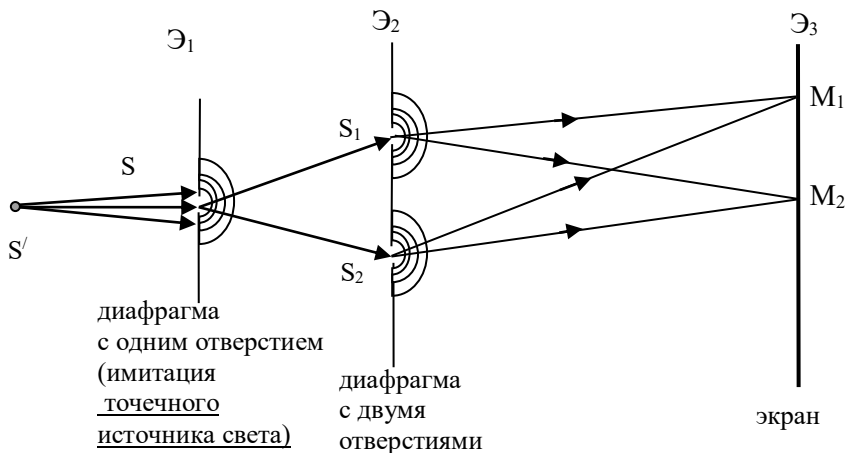
$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{\omega}{c} (n_1 s_1 - n_2 s_2) \quad (2)$$

Для наблюдения интерференции света необходимо создать такие условия, при которых в любой момент времени через точку

наблюдения проходили бы электромагнитные волны, излучаемые одной и той же группой атомов, но проходящие различные пути, т.е. волны, имеющие некоторую постоянную разность фаз.

Синхронизацию во времени двух независимых когерентных источников света осуществить сложно, поэтому световую волну от одного источника света разбивают на два пучка, которые направляют в одну и ту же точку по разным путям. Таким образом, в точке наблюдения складываются когерентные колебания одной и той же длины волны (частоты) и имеющие заданную разность хода.

Большинство схем получения интерференции света сводятся к **опыту Юнга**. Он заключается в том, что на пути монохроматического света, идущего от источника  $S_0$ , помещается непрозрачная пластина с двумя небольшими отверстиями, расположенными на небольшом расстоянии друг от друга. При этом на экране, находящемся за пластиной, наблюдается интерференционная картина. Отверстия в непрозрачной пластине, в соответствии с принципом Гюйгенса, являются источниками вторичных когерентных волн  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 1). Эти волны, пересекаясь в пространстве, интерферируют, т.е. в некоторых точках они взаимно усиливают друг друга, в других – ослабляют.



**Рис. 1.** Схема опыта Юнга для наблюдения интерференции световых волн

В природе не существуют независимые когерентные световые источники. Это связано с тем, что световые источники состоят из большого числа атомов различных сортов. Частота излучения таких систем, обусловленная электронными переходами в атомах, различна и изменяется хаотически. Хаотический характер изменения частоты приводит к невозможности наблюдения четкой интерференционной картины.

**Интерференционной картиной** называют чередование затемненных и освещенных полос (колец), возникающих на экране при наложении волн, идущих от когерентных источников.

В оптике когерентные волны и, соответственно, их источники могут быть получены двумя способами:

1. **делением амплитуды** исходной волны;
2. **делением волнового фронта** исходной волны.

Устройства, с помощью которых можно получить и наблюдать интерференционную картину от искусственно созданных когерентных источников, называют **интерферометрами**.

**Деление амплитуды** осуществляется в интерферометрах Майкельсона, Маха – Цендера, Тваймана – Грина, Жамена и т.д.. Деление амплитуды в них происходит за счет отражения и преломления пучка падающего света одного источника от системы прозрачных, полупрозрачных пластинок и зеркал. Причем они располагаются таким образом, чтобы разность хода лучей была постоянной.

В данной работе используют устройства, в которых осуществляется метод деления волнового фронта **Интерференция**, осуществляемая **делением волнового фронта**, впервые наблюдалась в **опыте Юнга**, который описан ранее.

Для получения дискретных когерентных источников методом деления волнового фронта можно использовать **зеркало Ллойда**. В этом случае на экране наблюдается перераспределение интенсивности светового потока, вызванное суперпозицией волны, идущей непосредственно от исходного источника, и волны, отраженной от зеркала. Когерентные источники и волны с помощью этого метода можно также получить, используя **бипризмы и бизеркала Френеля**. И бипризма, и бизеркало состоят из двух симметричных частей: бизеркало из двух зеркал, склеенных под некоторым углом, а бипризма из двух склеенных вдоль малого катета прямоугольных призм с одинаковыми и очень

малыми преломляющими углами (порядка  $30'$ ). Угол между зеркалами и в вершине бипризмы стремится к  $180^0$ . В этом случае когерентные источники будут находиться на малом расстоянии относительно друг друга, что и обеспечивает устойчивость интерференционной картины. В бипризме деление волнового фронта возникает за счет преломления световых лучей от исходного источника, а в бизеркале - за счет их отражения. Вторичные источники в бипризме и бизеркале являются мнимыми, то есть располагаются на продолжении рассеянных лучей.

В работе интерференция света наблюдается при помощи бипризмы Френеля. Если такую бипризму расположить так, чтобы источник света - щель, была параллельна ребру призмы (рис. 2), то на экране АВ, во всей области перекрытия пучков, наблюдается интерференция света.

Световая волна, идущая от источника S, преломляясь в двух половинах бипризмы, создает два когерентных пучка с заданной разностью хода. Проекция источника S на экране АВ соответствуют двум мнимым когерентным источникам, расположенным в точках  $S_1$  и  $S_2$ , а интерференционная картина аналогична случаю, рассмотренному выше.

Результирующая интенсивность при наложении когерентных волн в некоторой точке пространства (на экране) определяется соотношением:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (3)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  - интенсивности когерентных волн, а  $\delta$  - разность фаз между ними.

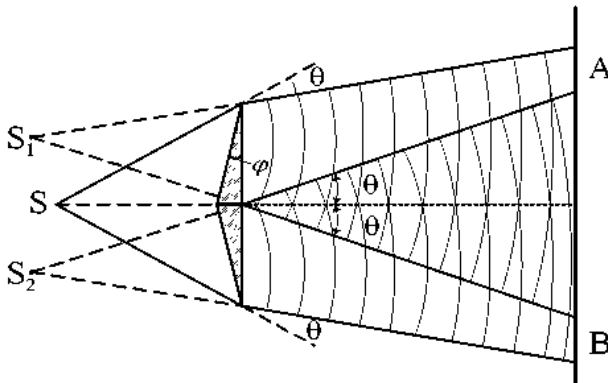


Рис. 2 Ход лучей в бипризме Френеля

Из (3) видно, что в случае, когда  $\cos \delta = \pm 1$  имеет место максимум или минимум интенсивности в данной точке на экране:

$$I_{\max} = (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2 \quad (4)$$

$$I_{\min} = (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2 \quad (5)$$

Если учесть значения  $\delta$  из условия наблюдения максимумов и минимумов интерференции  $\cos \delta = \pm 1$ , то можно получить соответствующие разности хода для них

$$\Delta = \pm k \lambda \quad (6)$$

$$\Delta = \pm \left( k + \frac{1}{2} \right) \lambda \quad (7)$$

где  $k$  - порядок интерференции, равный целому числу.

Первое уравнение отвечает максимуму интенсивности на экране, а второе интерференционному минимуму.

Рассчитаем ширину интерференционной полосы. Пусть  $t$  - расстояние между двумя источниками когерентных волн,  $L$  - расстояние от источников до экрана ( $t \ll L$ ) (рис. 3).

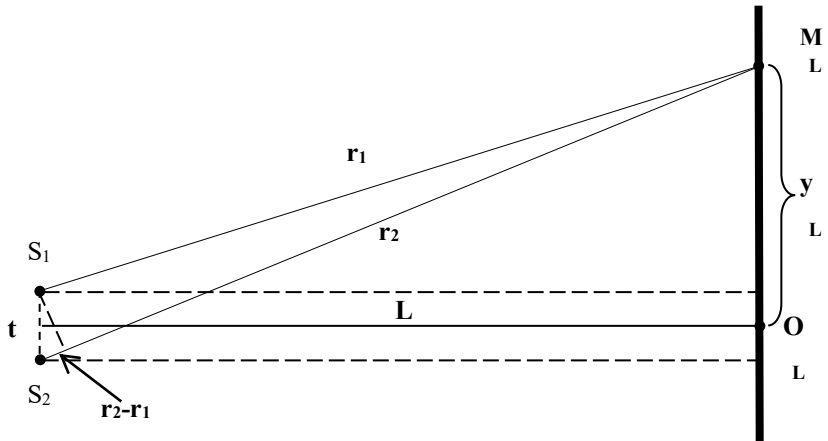


Рис. 3. Картина наложения световых лучей от двух когерентных источников

Из рис. 3 следует:

$$r_1^2 = L^2 + \left(y + \frac{t}{2}\right)^2; \quad r_2^2 = L^2 + \left(y - \frac{t}{2}\right)^2;$$

где  $y$  – расстояние от центра интерференционной картины до точки на экране

Если выполняются следующее условие  $r_2 - r_1 = k\lambda$ . ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ), то в точке  $M$  колебания усиливают друг друга – это соответствует условию максимума колебания.

Если имеет место условие  $r_2 - r_1 = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$ , то в точке  $M$  наблюдается темная интерференционная полоса.

Расстояние до произвольной светлой полосы от точки  $O$  определяется соотношением  $y = \frac{\kappa\lambda L}{t}$ , а темной полосы

$$y = \frac{(2k + 1)\lambda L}{2t}$$

Расстояние между двумя соседними светлыми (или темными) полосами равно

$$\Delta y = y_{k+1} - y_k = \frac{\lambda L}{t} \quad (8)$$

Расстояние  $\Delta y$  называется шириной интерференционной полосы.

## ХОД РАБОТЫ

### А. Измерение расстояния между двумя мнимыми источниками света

1. Собрать установку на оптической скамье (рис. 4). На рисунке показано расположение приборов сверху. На рисунке  $O$  – осветитель;  $S$  – щель;  $B$  – бипризма Френеля;  $L$  – собирающая линза;  $\mathcal{E}$  – матовый экран;  $M$  – отсчетный микроскоп;  $C\phi$  – светофильтр, который ставят при выполнении части работы В.

Ребро бипризмы обязательно должно быть строго параллельно щели. Расстояние  $a'$  между бипризмой и щелью во время опыта остается постоянным. Все части установки: окно осветителя, середина щели, бипризма и окулярный микроскоп – должны быть

на одной высоте. Экран устанавливают на расстоянии 50 -60 см от щели матовой стороной к микроскопу.

2. Передвигая линзу  $L$ , добиться того, чтобы оба изображения щели были отчетливо видны на экране  $\mathcal{E}$ . Установив определенный тубус микроскопа, перемещать его до тех пор, пока не будет видно в поле зрения микроскопа отчетливое изображение мнимых источников  $S_1$  и  $S_2$ . Чтобы проверить резкость изображения, удалить матовое стекло.

3. Закрепить щель, линзу, экран и микроскоп. Линейкой измерить расстояние  $l$  от щели до матовой стороны экрана (рис. 4). Расстояние  $l$  от щели до экрана можно считать за расстояние от плоскости, в которой находятся мнимые источники  $S_1$  и  $S_2$  до экрана, т.к. смещение этой плоскости от плоскости, в которой лежит щель  $S$ , очень незначительно.

4. Перед щелью расположить красный светофильтр и по шкале отчетного микроскопа определить расстояние между мнимыми источниками в монохроматическом свете.

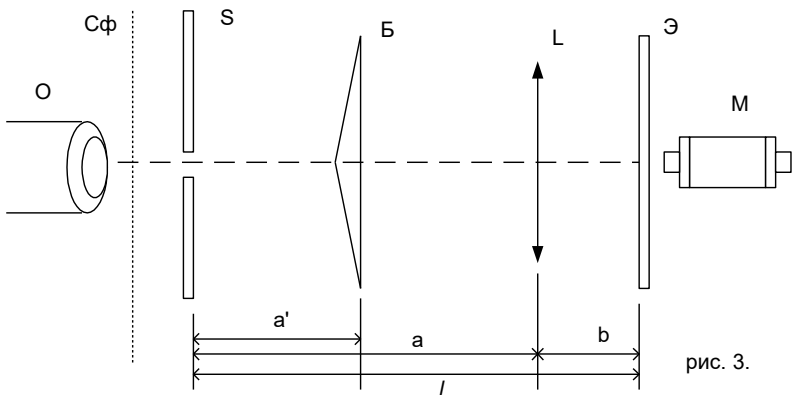


рис. 3.

Рис. 4. Схема установки с бипризмой Френеля

Если переводной множитель отсчетного микроскопа  $Z$ , то расстояние между мнимыми источниками

$$t_x = nZ,$$

где  $n$  - число делений шкалы отсчетного микроскопа, укладываемое между крайними линиями мнимых источников света  $S_1$  и  $S_2$  в поле зрения микроскопа.

5. Измерить расстояние  $a$  от щели  $S$  до линзы и расстояние  $b$  от линзы  $L$  до экрана  $\mathcal{E}$ . Все измерения проделать несколько раз.

6. По формуле увеличения линзы найти расстояние  $t$  между мнимыми источниками

$$t = \frac{a}{b} \cdot t_x \quad \text{или} \quad t = \frac{a}{b} \cdot nZ \quad (9)$$

7. Все результаты внести в таблицу 2.

### **Б. Определение ширины интерференционной полосы $\Delta y$**

1. Расстояние  $a'$  между бипризмой и щелью установить неизменным. Снять со скамьи линзу  $L$  и экран  $\mathcal{E}$ .

2. Микроскоп приблизить почти вплотную к бипризме. Далее удаляя микроскоп сначала зафиксировать вертикальную световую полосу, а затем получить картину полос интерференции.

3. Поставить перед микроскопом экран матовой стороной к микроскопу и, передвигая его, добиться отчетливой картины в поле зрения микроскопа.

4. Измерить расстояние  $f$  от щели до матовой поверхности экрана.

5. Экран убрать. Между щелью и осветителем поместить светофильтр.

6. Отсчетным микроскопом измерить расстояние между самыми крайними полосами

$$x = NZ,$$

где  $N$  - число делений микроскопа, укладываемого между крайними световыми полосами,  $Z$  - переводной множитель микроскопа при данной длине тубуса (табл. 1).

7. Подсчитать количество темных полос  $m$ , укладываемых на отрезке  $x$  и найти расстояние между двумя соседними темными (светлыми) полосами

$$\Delta y = \frac{x}{m} = \frac{NZ}{m} \quad (10)$$

Из формул (8), (9) и (10) получить:

$$\lambda = \frac{\Delta y t}{l}; \quad \lambda = \frac{NZt}{ml}; \quad \lambda = \frac{nNaZ^2}{mbl}; \quad (11)$$

Опыты проделать не менее трех раз для красного светофильтра. В формуле (11) величины  $a$  и  $b$  - выразить в миллиметрах. Все полученные опытным путем и вычислением результаты внести в таблицу 3.

**Таблица 1**

Длина тубуса, мм	Цена одного деления шкалы $Z$ , мм
130	0,058
140	0,053
150	0,049
160	0,045
170	0,041
180	0,038
190	0,036

**Таблица 2**

№ пп	Тубус микроскопа	Данные наблюдений					Результаты вычислений			
		$Z$	$n$	$t_x$ , м	$a$ , м	$b$ , м	$t$ , м	$\Delta t$ , м	$\frac{\Delta t_{cp}}{t_{cp}} \cdot 100\%$	
1										
2										
3										
Среднее значение:										

**Таблица 3**

Свето-фильтр	Данные наблюдений							Результаты вычислений		
	$Z$	$N$	$m$	$f$ , м	$x$ , м	$\Delta y$ , м	$t$ , м	$\lambda$ , м	$\Delta \lambda$ , м	$\frac{\Delta \lambda_{cp}}{\lambda_{cp}} \cdot 100\%$
1										
2										
3										
Среднее значение:										

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА

1. В чем состоит явление интерференции?
2. Какие источники являются когерентными?
3. Как определяется разность хода между световыми лучами?

Какова связь между разностью фаз и разностью хода?

4. Получите условия наблюдения интерференционных максимумов и минимумов.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким образом определяется ширина интерференционной полосы?

2. Опишите ход когерентных лучей в бипризме Френеля.

3. Для решения, каких задач в оптике используется бипризма Френеля?

4. Способы получения когерентных источников (суть и краткое описание).

## Тема: ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ И ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

**Цель работы:** определить радиус кривизны линзы и длину световой волны с помощью колец Ньютона.

**Приборы и принадлежности:** осветитель, микроскоп, микрометр окулярный винтовой МОВ-1-15, линза, набор светофильтров.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Явление наложения когерентных волн, которое приводит к перераспределению интенсивности светового потока в заданной области пространства называют **интерференцией**. Для наблюдения интерференции когерентные источники должны быть дискретными (разделенными) в пространстве.

Волны являются **когерентными**, если их частоты равны, а разность хода (фаз) остается неизменной. Под **оптической разностью хода**  $\Delta$  двух любых лучей понимают величину равную разности их оптических длин пути ( $L_1$  и  $L_2$ ):

$$\Delta = L_1 - L_2 = n_1 s_1 - n_2 s_2, \quad (1)$$

где  $n_1, n_2$  - относительные показатели преломления сред, в которых соответствующие лучи распространяются.

Разность фаз связана с разностью хода по формуле:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta. \quad (2)$$

Если происходит наложение когерентных волн, то их результирующая интенсивность в произвольной точке будет определяться соотношением:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (3)$$

Из соотношения (3) видно, что максимум интенсивности будет при  $\cos \delta = 1$ ,  $\delta = 2\pi \cdot m$ :

$$I_{\max} = \left( \sqrt{I_1} + \sqrt{I_2} \right)^2. \quad (4).$$

Это означает, что для наблюдения интерференционного максимума, согласно формуле (2), в разность хода должно укладываться четное число полуволин:

$$\Delta = 2m \frac{\lambda}{2}. \quad (5)$$

Интерференционный минимум согласно (3) будет наблюдаться при условии  $\cos \delta = -1$ ,  $\delta = (2m + 1) \cdot \pi$ :

$$I_{\min} = (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2. \quad (6)$$

При этом в разность хода должно укладываться нечетное число полуволин:

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (7)$$

В целом, в результате суперпозиции когерентных волн, на экране должна наблюдаться интерференционная картина. **Интерференционной картиной** называют чередование затемненных и освещенных полос (колец), возникающих на экране при наложении волн, идущих от когерентных источников.

**Интерференция в тонких пленках** основывается на том, что световая волна, падающая на пленку, испытывает отражение от ее двух поверхностей (рис. 1).

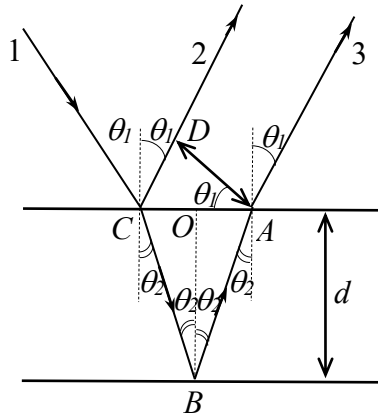


Рис. 1. Ход лучей в тонкой пленке

В результате в каждой точке пленки возникают два луча отраженных от различных поверхностей. Они являются когерентными, так как созданы одним источником. При их суперпозиции можно наблюдать интерференционную картину. **Разность хода** между лучами  $\Delta$  зависит от толщины пленки  $d$ , угла падения лучей  $\theta$  и показателя преломления материала пленки  $n$ :

$$\Delta = 2b\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} - \frac{\lambda}{2}. \quad (8)$$

Соотношение (8) выполняется для плоскопараллельной пластинки в отраженном свете.

Для наблюдения устойчивой интерференционной картины толщина пленки должна быть достаточно малой.

При интерференции в тонких пленках получают либо интерференционные **линии равного наклона**, либо интерференционные **линии равной толщины**. Первые образуются при падении света от точечного источника на плоскопараллельную пленку, а вторые - при падении плоскопараллельного пучка света на клин. В первом случае возникает интерференционная картина (поэтому для ее наблюдения используют линзу, а экран устанавливают в ее фокальной плоскости), локализованная на бесконечности, а во втором – вблизи поверхности клина. Каждый максимум и минимум при образовании **линий равного наклона** связан с суперпозицией лучей, падающих **под определенным углом на пленку**. Каждый максимум и минимум при образовании **линий равной толщины** связан с суперпозицией лучей, отраженных **от участков клина с одинаковой толщиной**. В наиболее общем случае вместо полос того или иного типа образуются полосы смешанного типа.

Полосы равного наклона образуются в плоскопараллельной пластинке, рассмотренной выше.

Классическим примером полос равной толщины являются **кольца Ньютона**. Они образуются при нормальном падении света на систему, состоящую из толстой стеклянной пластинки и размещенной на ней плосковыпуклой линзы таким образом, чтобы ее выпуклая часть была обращена к этой пластинке. Роль клина при этом играет воздушная прослойка между линзой и стеклянной пластинкой.

При **интерференции белого света** все максимумы, кроме центрального максимума, представляют собой систему радужных колец или полос. Их появление связано с дисперсией белого света

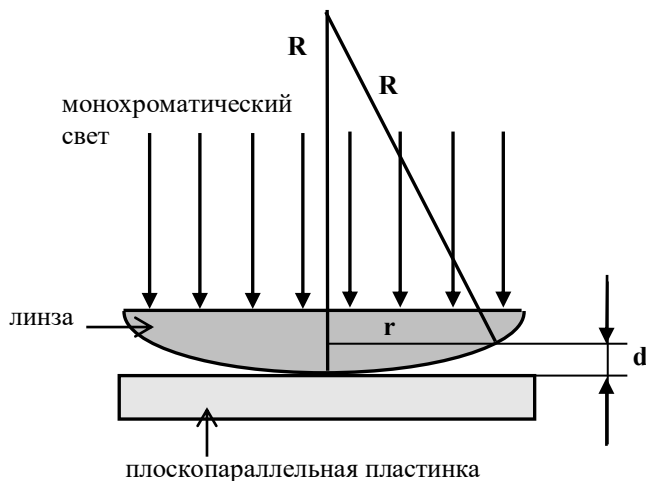
при прохождении через различные элементы оптических устройств. Интерференционная картина, полученная при падении белого света, смазывается уже при малых порядках интерференции  $m$  в отличие от картины, полученной при падении монохроматического света на интерферометр.

В нашей установке кольца Ньютона образуются при интерференции световых волн, отражённых от границ тонкой воздушной прослойки, заключённой между выпуклой поверхностью линзы и плоской стеклянной пластинкой. Для освещения линзы используется пучок монохроматических аксиальных лучей падающий нормально поверхности стеклянной пластинки. Наблюдение ведётся в отражённом свете. При вычислении разности хода можно пренебречь небольшими неизбежными наклонами лучей, проходящих в тонком воздушном зазоре. Геометрическая разность хода между интерферирующими лучами равна  $2d$ , где  $d$ - толщина воздушного зазора в данном месте. Выразим зависимость  $d$  от расстояния  $r$  до точки соприкосновения линзы и пластинки.

Из рис. 2 рассмотрим прямоугольный треугольник, образованный радиусами кривизны и радиусом сечения сферической линзы:

$$r^2 = R^2 - (R - d)^2 = 2Rd - d^2, \quad (9)$$

где  $R$ - радиус кривизны выпуклой поверхности линзы.



**Рис. 2.** Установка для наблюдения колец Ньютона

Принимая во внимание, что  $2R \gg d$ , находим:

$$d = \frac{r^2}{2R} \quad (10)$$

При вычислении полной разности хода нужно учесть изменение фазы световой волны при отражении от границ стекло – воздух и воздух – стекло. Как известно, для электрического вектора первое отражение происходит без изменения фазы, а второе – с изменением фазы на  $\pi$ . Свет, отражённый от границы стекло – воздух, по сравнению со светом отражённым от поверхности воздух – стекло, приобретает таким образом, дополнительный фазовый сдвиг на  $\pi$ , что соответствует разности хода  $\lambda/2$ . Полная разность хода  $\Delta$  равна:

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} \quad (11)$$

Линии постоянной разности хода представляют собой концентрические кольца с центром в точке соприкосновения. При заданном значении длины волны  $\lambda$ , разность хода  $\Delta$  зависит только от толщины воздушного зазора, интерференционные полосы являются, таким образом, линиями равной толщины.

Известно, что линии равной толщине локализованы на поверхности клина (в нашем случае на поверхности воздушной прослойки). Это означает, что при освещении системы не вполне параллельным пучком света (что практически всегда имеет место) интерференционные полосы оказываются наиболее чёткими при фокусировке на воздушную прослойку.

Учитывая условие минимума освещённости интерференционной картины (7) и полученную формулу для разности хода (11) можно получить для радиусов темных колец  $r_m$  следующее соотношение:

$$r_m = \sqrt{mR\lambda} \quad (12)$$

Аналогичным образом используя (5) и (11) можно найти для радиусов светлых колец  $r'_m$  формулу:

$$r'_m = \sqrt{(2m-1) \cdot \frac{R\lambda}{2}} \quad (13)$$

Измеряя радиусы светлых или тёмных колец используя микроскоп, можно с помощью формул (12) и (13) определить  $\lambda$ , если известен радиус  $R$  кривизны линзы, или, наоборот, по известному  $\lambda$  найти  $R$ .

## ХОД РАБОТЫ

### А. Определение радиуса кривизны линз

1. Установить на осветителе желтый светофильтр ( $\lambda = 0,585$  мкм) и включить осветитель.

2. Сфокусировать микроскоп на ясное видение в окуляре микроскопа колец Ньютона.

3. Измерить диаметры 3 – 4 темных колец Ньютона. Для этого необходимо установить перекрестие окулярного микрометра на окружность измеряемого кольца справа и снять первый отсчет по микрометру. Затем переместить это перекрестие по диаметру, настроить на эту же окружность слева и снять второй отсчет по микрометру. Разность между первым и вторым отсчётом даст нужное значение.

4. Такой отсчёт проделать для трех-четырех колец и затем определить радиусы этих колец.

5. Определить радиус кривизны линзы по формуле:

$$R = \frac{(r_m - r_n) \cdot (r_m + r_n)}{(m - n) \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{K^2}; \quad (14)$$

где  $K = 4.7$  – константа, определяемая оптической системой микроскопа,  $m$  и  $n$  – номера колец,  $r_m$  и  $r_n$  – радиусы этих колец.

6. Вычислить три значения  $R$  и данные занести в таблицу 1.

**Таблица 1**

Данные наблюдений				Результаты вычислений				
№	$n$	$m$	$r_n, \times 10^{-3}$ м	$r_m, \times 10^{-3}$ м	$\lambda, \times 10^{-6}$ м	$R$ , м	$R_{ср}$ , м	$\varepsilon$ , %
<b>Желтый</b>								
1	1	3						
2	2	3						
3	1	2						

## Б. Определение длины волны монохроматического света

1. Установить на осветителе красный светофильтр.
2. Измерить диаметры трех – четырех тёмных колец Ньютона.
3. Определит радиусы тёмных колец и найти длину волны красного света по формуле:

$$\lambda = \frac{(r_m - r_n) \cdot (r_m + r_n)}{(m - n) \cdot R_{cp}} \cdot \frac{1}{K^2} \quad (7)$$

где  $R_{cp}$  – среднее значение радиуса кривизны линзы.

4. Измерения и вычисления проделать 3 раза и определить среднее значение  $\lambda$ .

5. Вставить в осветитель зелёный светофильтр и произвести измерения по п.2, 4 для зеленого света.

6. Определить  $\lambda$  для зеленого света. Данные занести в табл. 2.

Таблица 2

		Данные наблюдений				Результаты вычислений				Справочное значение
N n/n	n	m	$r_n, \times 10^{-3}$ м	$r_m, \times 10^{-3}$ м	$R_{cp},$ м	$\lambda, \times 10^{-6}$ м	$\Delta\lambda, \times 10^{-6}$ м	$\epsilon, \%$	$\lambda, \times 10^{-6}$ м	
<b>Красный</b>										
1	1	3								
2	2	3								
3	1	2								
Среднее значение:										
<b>Зеленый</b>										
1	1	3								
2	2	3								
3	1	2								
Среднее значение:										

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА

1. Какие волны называются когерентными?
2. Дайте определение интерференции.
3. В чем состоит условие максимумов и минимумов для интерференции?
4. Как происходит интерференция света в тонких пленках?

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как образуются кольца Ньютона?
2. Запишите и объясните формулу для экспериментального определения радиуса кривизны линзы при помощи колец Ньютона.
3. Что будет наблюдаться в центре колец Ньютона при наблюдении интерференции в проходящем свете?
4. Почему радиус кривизны линзы должен быть велик?
5. Почему, по мере удаления от центра, кольца Ньютона располагаются ближе друг к другу?
6. Почему при освещении белым цветом кольца приобретают радужную окраску и их число уменьшается? Какова окраска 1-го кольца? Какие кольца тесней расположены, красные или синие?

Тема: **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ  
ПРЕЛОМЛЕНИЯ И КОНЦЕНТРАЦИИ  
РАСТВОРА САХАРА  
ПРИ ПОМОЩИ РЕФРАКТОМЕТРА РПЛ**

**Цель работы:** определить показатель преломления и концентрации раствора сахара.

**Приборы и принадлежности:**

- Рефрактометр – РПЛ
- колбы с различными концентрациями раствора сахара.

**КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**

Рефрактометром называют прибор, служащий для определения показателя преломления световых лучей в прозрачных жидкостях. Принцип действия прибора основан на явлении полного внутреннего отражения, возникающем на границе раздела двух сред, при переходе луча из оптически более плотной в оптически менее плотную среду.

Под абсолютным показателем преломления среды понимают отношение скорости света в вакууме (воздухе) к скорости света в данной среде:

$$n = \frac{c}{v}. \quad (1)$$

Закон полного внутреннего отражения вытекает из таких законов геометрической оптики как закон отражения и закон преломления световых лучей. При падении пучка света на границу раздела двух сред, с различной оптической плотностью происходит его разделение на два пучка: отраженный и преломленный, таким образом, что энергия начального пучка сохраняется.

Доля энергии преломленного и отраженного пучка определяется показателями преломления сред, которые характеризуют оптическую плотность вещества, и выражается через энергетические коэффициенты преломления  $\tau$  и отражения  $\rho$  соответственно. Эти коэффициенты для нормального падения определяются соотношениями:

$$\rho = \left( \frac{n_{12} - 1}{n_{12} + 1} \right)^2, \quad (2)$$

$$\tau = n_{12} \left( \frac{2}{n_{12} + 1} \right)^2, \quad (3)$$

где  $n_{12}$  - относительный показатель преломления света двух сред, который можно найти по формуле:

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (4)$$

Относительным показателем преломления света называют физическую величину равную отношению оптической плотности второй среды к оптической плотности первой или обратному отношению скоростей в этих средах.

Из формулы (4) видно, что чем больше оптическая плотность среды, тем меньше скорость распространения света в ней, то есть между показателем преломления среды и скоростью распространения света существует обратная связь.

Та среда, у которой показатель преломления больше называется **оптически более плотной**, а та, у которой меньше - **оптически менее плотной**.

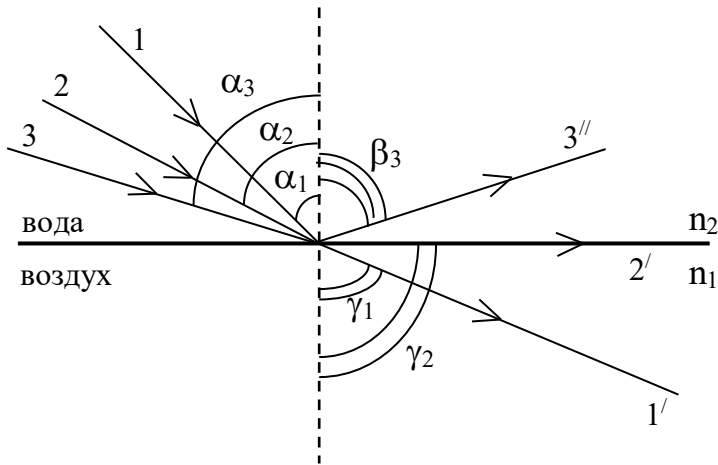
Отражение и преломление происходит в определенной плоскости – плоскости падения светового луча. Частоты падающего, отраженного и преломленного света одинаковы из условия равенства фаз соответствующих световых волн.

**Закон отражения** состоит в следующем: луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точку падения, лежат в одной плоскости. Причем угол отражения равен углу падения.

**Закон преломления (закон Снеллиуса)** также устанавливает связь между углами падения и преломления: луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точку падения, лежат в одной плоскости. Причем отношение синуса угла падения  $\alpha$  к синусу угла преломления  $\gamma$  (см. рис. 1) равно отношению скоростей света в первой и второй средах соответственно. Для закона преломления есть математическое соотношение:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} \quad (5)$$

Существуют такие границы раздела сред, для которых свет при падении под определенным углом не преломляется. Это явление называется явлением **полного внутреннего отражения**. Оно возникает тогда, когда первая среда оптически более плотная, чем вторая ( $n_1 > n_2$ ). Предельные углы падения, при которых наблюдается это явление, определяются по формуле соответствующей закону преломления.



**Рис. 1.** Явление полного внутреннего отражения (ПВО)

Обозначим углы падения лучей через  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ , соответствующие углы преломления через  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ , а угол отражения через  $\beta_3$ . Пусть луч падает на границу раздела вода-воздух. При этом угол падения постепенно увеличивают (рис. 1).

Луч 1 в точке падения преломляясь, пойдет по направлению 1' в воздухе. Луч 2 после преломления скользит по границе двух сред, т.е. его угол преломления  $\gamma_2$  равно  $90^\circ$ . Если угол падения луча станет еще больше, например,  $\alpha_3$ , то луч света полностью отразится от границы раздела сред в воду. Это явление называется явлением полного внутреннего отражения. Угол падения  $\alpha_2$  называется

предельным углом полного внутреннего отражения или просто углом полного внутреннего отражения. Его можно рассчитать по формуле из (5) учитывая, что  $\gamma = 90^\circ$ :

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}, \Rightarrow \sin \alpha_2 = \frac{n_2}{n_1}, \Rightarrow \sin \alpha_2 = n_{12} \quad (6)$$

Главной частью рефрактометра является система двух прямоугольных призм – осветительной (A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>) и измерительной (ABC), сделанных из стекла с большим показателем преломления (рис. 2). У осветительной призмы грань A<sub>1</sub>B<sub>1</sub> матовая, а грань АВ измерительной призмы полированная. Призмы расположены так, что между указанными гранями остается узкое пространство, которое заполняется исследуемой жидкостью.

При работе в проходящем свете лучи от источника света проходят через грань B<sub>1</sub>C<sub>1</sub> осветительной призмы и падают на матовую поверхность грани A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>. Вследствие рассеяния света матовой поверхностью в исследуемую жидкость входят лучи под всевозможными углами (см. точки *a* и *b* на рис.2). Благодаря этому, углы падения лучей, падающих на границу АВ жидкость-стекло, будут иметь значения от 0° до 90°. Для луча, скользящего по границе раздела, угол падения 90° и согласно закону преломления при полном внутреннем отражении:

$$n_2 = n_1 \sin \alpha_2$$

где  $n_2$  – показатель преломления жидкости, а  $n_1$  – показатель преломления призмы ( $n_1 > n_2$ ),  $r_0$  – предельный угол полного внутреннего отражения.

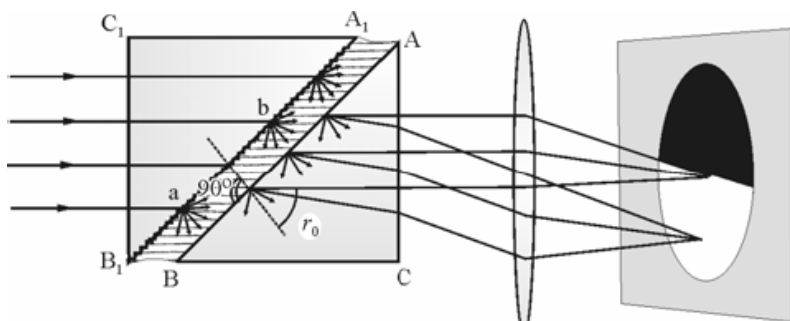


Рис. 2. Ход лучей в рефрактометре

Если на пути лучей, выходящих из измерительной призмы, поставить зрительную трубу, то нижняя половина её поля зрения будет освещена, а верхняя остается темной. При этом положение границы светотени определяется лучом, соответствующим предельному углу.

При работе в отраженном свете лучи света направлены на матовую грань BC измерительной призмы. Лучи на ней рассеиваются, попадают на грань AB под всевозможными углами и преломляются на границе стекло-жидкость.

Те лучи, которые падают на поверхность AB под углом меньшим предельного, пройдут в жидкость и далее в призму A1B1C1. Лучи, которые упадут на границу под углом, большим предельного, претерпят в призме ABC полное внутреннее отражение и выйдут через границу AC.

В поле зрения зрительной трубы будут наблюдаться две области: верхняя – ярко освещенная и нижняя – темная. Положение границы светотени определяется величиной предельного угла, то есть зависит от величины показателя  $n$  преломления жидкости.

Показатели преломления растворов отличаются от показателя преломления растворителя. Это связано с тем что растворяемое вещество при введении его в растворитель меняет его физико-химические свойства.

При растворении сахара в воде изменяется плотность полученной среды как механическая, так и оптическая, так как среда становится неоднородной. Они обе возрастают с ростом концентрации раствора. Рост оптической плотности обусловлен тем, что среда для прохождения световых лучей становится более плотной и скорость их распространения в ней уменьшается. Кроме того, оптическая плотность зависит от температуры, давления раствора и т.д. Поэтому при измерении концентрации среды все эти факторы нужно учитывать

Показатели преломления растворов сахара необходимо измерять так как они помогают определить концентрацию сахара в продуктах питания, контролировать качество лекарственных средств, а также изучать свойства веществ и их взаимодействия. Измерение концентрации растворов сахара играет важную роль в различных отраслях науки и техники, таких как пищевая промышленность, медицина, химия и другие.

## ХОД РАБОТЫ

1. Свет от лампы накаливания направить на осветительную призму.
2. Открыть камеру измерительной призмы и пипеткой нанести 2-3 капли дистиллированной воды. Закрывать камеру.
3. Добиться наилучшей освещенности поля зрения.
4. Вращать ручку компенсатора до тех пор, пока окраска граничной линии не исчезнет.
5. Рукоятку окуляра перемещать до тех пор, пока визирная линия не станет на линию раздела светлой и темной частей. Если этого нет, то при помощи ключа установить линию раздела и визирную линию на деление  $0^0$ , соответствующее коэффициенту преломления 1,333 (для дистиллированной воды).
6. Вытереть дистиллированную воду и нанести 3 капли раствора. В окуляре при этом будет наблюдаться изменение границы.
7. При помощи рукоятки окуляра добиться совпадения линии с границей раздела полей.
8. По шкале определить показатель преломления и концентрацию раствора. Данные занести в таблицу 1, приведенную ниже.

Таблица 1

№	H <sub>2</sub> O		C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>		C <sub>3</sub>	
	C %	n <sub>0</sub>	C <sub>1</sub> , %	n <sub>1</sub>	C <sub>2</sub> , %	n <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> , %	n <sub>3</sub>
1								
2								
3								
Ср. знач.								

## ВОПРОСЫ ДОПУСКА

1. Какую величину называют абсолютным показателем преломления? По какой формуле его можно определить?
2. Что такое относительный показатель преломления? Приведите формулу.
3. От чего зависят и как оценить энергетические коэффициенты отражения и преломления света при его нормальном падении на границу раздела света?

4. Сформулируйте законы отражения и преломления света. Запишите закон преломления математически.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем явление полного внутреннего отражения (ПВО)?
2. При каких условиях для границы раздела сред можно наблюдать явление ПВО?
3. Объясните назначение, устройство и принципы работы рефрактометра.
4. Объясните суть метода определения концентрации сахара в растворе с помощью рефрактометра.

## Тема: ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА САХАРА ПОЛЯРИМЕТРОМ

**Цель работы:** На основе явления вращения плоскости поляризации оптически активным раствором сахара определить концентрацию сахара в водном растворе.

**Приборы и принадлежности:** поляриметр, трубка, колбы с раствором сахара, осветитель.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Устройства, с помощью которых можно получить поляризованный свет, называют поляризаторами. Их принцип действия основан на явлении двойного лучепреломления в одноосных и двуосных кристаллах. Это явление заключается в том, что при падении естественного света на такие кристаллы образуются два луча: обыкновенный и необыкновенный. Обыкновенный луч преломляется согласно закону Снеллиуса и поляризован в плоскости перпендикулярной главной, а необыкновенный луч не подчиняется этому закону и поляризован в главной плоскости.

Обычно для получения поляризованного света гораздо удобнее применять не отдельные кристаллы, а их комбинации – поляризационные призмы. Самый первый кристаллический поляризатор – призма Николя или просто николь, был сделан исландским физиком Николем в 1828 году. Для получения плоскополяризованного света основания призмы из исландского шпата подшлифовываются так, чтобы они образовали с ребрами угол  $68^\circ$ , после этого призму распиливают по плоскости, перпендикулярной к основаниям, и склеивают канадским бальзамом. Продольное сечение призмы изображено на рис. 1.

Обыкновенный луч (o) имеет постоянный абсолютный показатель преломления, то есть распространяется в кристалле по всем направлениям с одинаковой скоростью. Абсолютный показатель преломления необыкновенного луча (e) зависит от угла падения, то есть скорость его распространения зависит от направления.

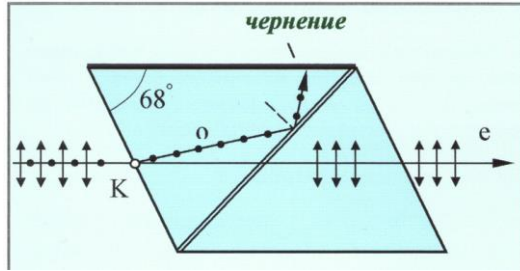


Рис. 1. Продольное сечение призмы Николя

В кальците абсолютный показатель преломления необыкновенного луча  $n_e$  для всех направлений за исключением оптической оси меньше, чем обыкновенного  $n_o$ . Абсолютный показатель преломления канадского бальзама  $n_6$  имеет промежуточное значение  $n_o > n_6 > n_e$ . Так как показатель преломления обыкновенного луча  $n_o = 1.658$  больше показателя преломления бальзама  $n_6 = 1.55$ , то обыкновенный луч не проходит призму. Этот луч испытывает полное внутреннее отражение от слоя бальзама и поглощается зачерненной поверхностью поляризатора или выводится из кристалла с помощью специальной призмы, приклеенной к кристаллу.

Луч необыкновенный, показатель которого меньше показателя преломления бальзама, беспрепятственно проходит через призму и дает на выходе плоско-поляризованный свет с известным направлением колебаний. Таким образом, пропустив через призму Николя естественный свет, получим на выходе плоско-поляризованный.

Всякий поляризатор может быть использован для исследования поляризованного света в качестве анализатора. Интенсивность света, прошедшего через систему поляризатор – анализатор, зависит от угла между их главными плоскостями. Если эти плоскости параллельны, то интенсивность проходящего света – максимальна, если перпендикулярны (скрещены), то – минимальна. В общем случае интенсивность света, проходящего через систему поляризатор – анализатор, подчиняется закону Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность поляризованного света, падающего на анализатор,  $I$  – интенсивность света, прошедшего через анализатор, при абсолютной прозрачности последнего,  $\varphi$  – угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора.

Прибор, состоящий из поляризатора  $\Pi$  и анализатора  $A$ , называется **поляриметром**.

Поляриметры применяются в научных и технических исследованиях, а также в медицине. В частности, они широко применяются для определения концентрации сахара в растворе. Поляриметры, применяемые для этой цели, называются **сахариметрами** (рис. 2). Действие сахариметра основано на законе Малюса и на явлении вращения плоскости поляризации.

Некоторые вещества (кварц, раствор сахара, скипидар), называемые **оптически активными**, характеризуются способностью вращать плоскость поляризации. Это явление называется явлением вращения плоскости поляризации. Оно состоит в том, что после прохождения плоско-поляризованного света через вещество плоскость поляризации (вектор  $E$ ) оказывается повернутой относительно первоначального положения на некоторый угол  $\varphi$ , называемый углом поворота плоскости поляризации.

Опыт показывает, что все вещества, оптически активные в жидком состоянии, обладают таким же свойством и в кристаллическом состоянии. При этом, вещества, оптически активные в кристаллическом состоянии, не всегда активны в жидком состоянии (например, расплавленный кварц). Следовательно, оптическая активность обусловлена как строением молекул вещества (их асимметрией), так и особенностями расположения частиц в кристаллической решетке.



**Рис. 2.** Схематическое устройство сахариметра

Оптически активные вещества в зависимости от направления вращения плоскости поляризации разделяются на два типа право- и левовращающие. В первом случае плоскость поляризации, если смотреть навстречу лучу, вращается вправо (по часовой стрелке), во втором - влево (против часовой стрелки).

Вращение плоскости поляризации в оптически неактивных веществах становится возможным при помещении их во внешние магнитные и электрические поля. Вращение плоскости поляризации во внешнем магнитном поле носит название **эффекта Фарадея**, а вращение плоскости в электрическом поле **эффектом Керра**.

Экспериментально было установлено, что **угол поворота** плоскости поляризации **для оптически активных кристаллов и чистых жидкостей** пропорционален толщине вещества  $d$  :

$$\varphi = \alpha d, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – удельное вращение, которое равно углу поворота плоскости поляризации слоем оптически активного вещества единичной толщины.

Опыт показал, что **угол поворота** плоскости поляризации для оптически активных растворов можно найти по формуле (закон Био):

$$\varphi = c\alpha d, \quad (3)$$

где  $c$  – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

Массовая концентрация  $c$  (кг/м<sup>3</sup>) активного вещества равна массе активного вещества в единице объема раствора:

$$c = \frac{m}{V}, \quad (4)$$

где  $V$  – объем раствора,  $m$  – масса активного вещества в этом объеме.

На практике раствор предпочитают характеризовать относительной концентрацией  $P$  :

$$P = \frac{m}{m + M}, \quad (5)$$

где  $M$  – масса растворителя.

Плотность раствора определить соотношением:

$$\rho = \frac{m + M}{V}. \quad (6)$$

Подставим объем из (6) в (4), выделим в нем концентрацию (5) и получим:

$$c = P \cdot \rho. \quad (7)$$

Соотношение (7) связывает массовую концентрацию активного вещества и плотность раствора.

Удельное вращение  $\alpha$  – скалярная физическая величина, которая характеризует природу вещества и обратно пропорционально квадрату длины волны используемого света и слабо зависит от температуры. Для большинства веществ  $\alpha$  уменьшается на 0,001 при повышении температуры на 10.

Теория вращения плоскости поляризации была разработана Френелем. Сущность ее сводится к следующему. Всякая плоскополяризованная волна может быть представлена как результат сложения двух волн, поляризованных по кругу, векторы  $E$  которых вращаются с одной и той же угловой скоростью в противоположных направлениях. В оптически активной среде лучи, поляризованные по кругу, распространяются с различной скоростью. Поэтому возникает разность фаз  $\beta$ , которая зависит от толщины слоя оптически активного вещества  $d$ , периода колебания  $T$  и скорости распространения волн  $v_1$  и  $v_2$  с правым и левым вращением:

$$\beta = \frac{2\pi d}{T} \cdot \left( \frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right). \quad (8)$$

Наличие разности фаз приводит к тому, что плоскость поляризации волны, эквивалентной двум поляризованным по кругу, непрерывно поворачивается и при выходе оказывается повернутой относительно плоскости поляризации падающей волны.

Основная причина различия показателей преломления, а, следовательно, и скоростей распространения волн, поляризованных по кругу, заключается в наличии элементов спиральности в строении молекул активного вещества. При совпадении направления вращения плоскости поляризации волны и спирали молекул активного вещества, скорость распространения волны будет меньше.

Для света такой поляризации оптическая среда будет плотнее. Для волны другой круговой поляризации оптическая среда будет менее плотной.

Естественное вращение плоскости поляризации можно наблюдать, поместив оптически активное вещество между поляризатором и анализатором. Если главные плоскости поляризатора и анализатора взаимно перпендикулярны (скрещены), то плоскополяризованный свет, вышедший из поляризатора, в отсутствие оптически активного вещества будет целиком задержан анализатором и поле зрения будет темным. Если ввести между ними оптически активное вещество, то это приведет к повороту плоскости поляризации, благодаря чему поле зрения просветлеет. Чтобы снова добиться минимума интенсивности света необходимо на такой же угол повернуть анализатор. Таким образом можно найти и угол поворота плоскости поляризации в исследуемом веществе.

Однако такой метод недостаточно точен, ибо визуально трудно найти с достаточной точностью положение анализатора, соответствующее максимальному затемнению поля зрения. Это объясняется тем, что затемнение поля происходит постепенно и заметить момент полного исчезновения света трудно. Для устранения этого недостатка применяется так называемый полутеневого метод, который используется в поляриметре с бикварцевой пластинкой, в котором установка производится не на полную темноту, а на равномерное затемнение двух, или более частей поля зрения.

В данной работе установка настроена не на темноту поля зрения, а на равную яркость полей сравнения. Идея метода, предложенного в работе заключается в следующем. В оптическую схему прибора, кроме поляризатора 3 и анализатора 7, вводят кварцевую пластинку 4 (рис. 3) небольшой толщины, ориентированную по отношению к поляризатору так, что она

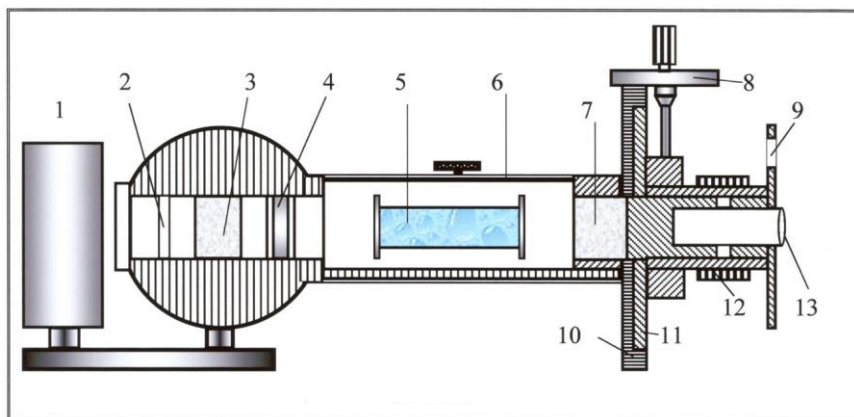


Рис. 3. Принципиальная схема поляриметра

поворачивает плоскость поляризации лучей, прошедших через поляризатор, на некоторый небольшой угол (порядка  $5^\circ$ ). Кварцевая пластинка вырезана так, что она покрывает собой лишь среднюю часть поля зрения, наблюдаемого в окуляр 13. Боковые же части поля зрения освещаются светом, прошедшим только через поляризатор. Если теперь установить анализатор так, чтобы его плоскость поляризации оказалась перпендикулярной к плоскости поляризации поляризатора, то свет в боковых частях поля зрения погасится, а через среднюю часть проходит заметный свет (рис. 4 – Ia). При повороте анализатора на небольшой угол можно совершенно погасить среднюю часть поля зрения, но боковые части будут освещены (рис. 4 – Ic). Очевидно, что найдется такое положение анализатора (рис. 4 – Ib) при котором и боковые, и средняя часть поля зрения будут равномерно освещены (установка на «полутень»).

Если после установки прибора на полутень между поляризатором и анализатором ввести раствор сахара, то равномерность освещения боковых и средней части поля зрения нарушится; для получения равномерного освещения поля зрения нужно повернуть анализатор на угол, равный углу вращения плоскости поляризации луча вследствие прохождения им сахарного раствора.

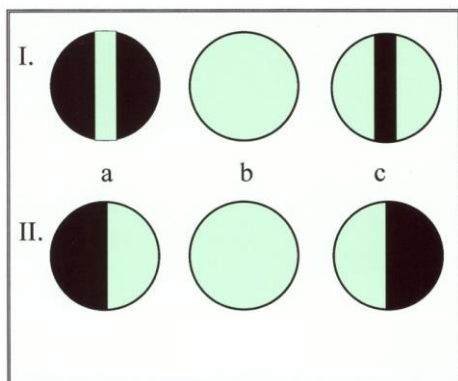


Рис. 4. Поле зрения в окуляре

В некоторых поляриметрах кварцевая пластинка расположена таким образом, что она перекрывает половину поля зрения. Тогда в поле зрения наблюдается не тройное, а двойное поле (рис. 4, II), при этом суть метода остается прежней.

Так как равенство освещенностей, при котором граница между областями поля зрения пропадает, можно установить с гораздо

большой точностью, чем наступления минимальной освещенности, то полутеневого метод дает гораздо более точные результаты.

Схема используемого в работе поляриметра показана на рис. 3. Свет от лампы 1 проходит через оранжевый светофильтр 2 и попадает в поляризатор 3. Далее свет проходит через кварцевую пластинку 4, трубку 5 с исследуемым веществом, анализатор 7 и зрительную трубку. Через окуляр 13 наблюдается световое поле. Поступательным движением муфты 12 производится фокусировка зрительной трубки. Поворот анализатора осуществляется поворотом маховичка 8. Угол поворота анализатора отсчитывается по шкале лимба 10 через лупу 9. Шкала снабжена подвижным нониусом 11. Нуль шкалы соответствует одинаковой яркости всех участков светового поля в отсутствие оптически активного вещества.

Если между двумя николями поместить раствор сахара, то интенсивность света, вышедшего из анализатора, изменится. Угол поворота плоскости колебаний можно рассчитать по формуле аналогичной (3), используя не массовую, а долевую концентрацию  $C$ :

$$\varphi = C \cdot k \cdot l \quad (8)$$

где  $\varphi$  - угол поворота плоскости колебаний (градусы)

$l$  - толщина слоя раствора,

$k$  - постоянная прибора,

$C$  - долевая концентрация раствора.

Отсюда:

$$C = \frac{\varphi}{kl} \quad (9)$$

Итак, для нахождения концентрации раствора в данной работе достаточно измерить угол вращения плоскости колебания луча света, проходящего через слой раствора определенной толщины, кроме того, необходимо знать значение постоянной прибора. Долевая концентрация при этом фиксируется в процентах.

### ХОД РАБОТЫ

1. Включить источник света.
2. Откинуть стенку корпуса поляриметра. Убедиться, что трубка с раствором сахара вынута.
3. Вращением кремальеры установить анализатор на темноту с одинаковым затемнением обеих половин поля зрения, смотря в окуляр.
4. В верхнем окуляре прибора будет наблюдаться лимб с нониусом (при правильной установке  $\varphi = 0$ ).
5. Определить постоянную прибора следующим образом: поместить трубку с раствором сахара известной концентрации  $C_0$  и известной длины  $l=1$  дм (длину трубки принято выражать в дециметрах) между двумя николями. Закрыв крышку поворачивать кремальеру, добиваясь того, чтобы обе половины поля зрения были одинаково затемнены так, как было при первоначальной установке прибора. По нониусу окуляра отсчитать угол поворота плоскости поляризации:

$$\varphi_0 = C_0 \cdot k \cdot l_0.$$

Измерение угла  $\varphi_0$  сделать три раза и найти среднее значение.

6. Взять две другие трубки с растворами сахара неизвестной концентрации и по очереди, помещая их в поляриметр, найти значения углов для каждой трубки.

7. Подставляя измеренные значения  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  и известные  $l_1$  и  $l_2$ , вычислить среднее значение  $k$  по формуле (9), определить концентрацию  $C_1$  для одной трубки и  $C_2$  для другой. Все полученные результаты свести в таблицу, предложенную ниже.

Таблица

№ п/п	$\varphi_0$ , град	$k$	$\Delta k$	$\varepsilon$ , %	$k_{\text{нет}} =$ $k_{\text{ср}} \pm \Delta k_{\text{ср}}$	$l_1$ , м	$\varphi_1$ , град	$C_1$ %	$l_2$ , м	$\varphi_2$ , град	$C_2$ %
1											
2											
3											
Сред.зн.											
1											
2											
3											
Сред.зн.											
1											
2											
3											
Сред.зн.											

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА

1. Сформулируйте и объясните физический смысл закона Малюса.
2. В чем состоит явление вращения плоскости поляризации света?
3. Объясните устройство поляриметра.
4. В чем заключается явление двойного лучепреломления?
5. Начертите ход лучей в призме Николя.
6. Какие физические принципы лежат в основе работы призмы Николя?

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Расскажите методику определения концентрации раствора сахара.
2. Как объясняется вращение плоскости поляризации Френелем?
3. Могут ли вращать плоскость поляризации растворы веществ, образованных плоскими молекулами?
4. Как определяется угол поворота плоскости поляризации для оптически активных веществ.

## Тема: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОМОЩИ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ

**Цель работы:** Изучение дифракционных явлений лазерного света от щели и дифракционной решетки. Определение длины волны лазерного излучения.

**Приборы и принадлежности:** дифракционная решетка, экран, газовый оптический квантовый генератор ЛГ-209.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Причиной возникновения **дифракции** является огибание светом малых препятствий или малых отверстий, приводящее к появлению изображения в области геометрической тени (рис.1). Отклонение световых лучей на краях препятствий или отверстий от прямолинейного распространения приводит к изменению волнового фронта, падающего светового потока. Дифракция, как и интерференция, приводит к перераспределению интенсивности световой волны на экране. Однако она связана с суперпозицией световых волн, идущих от непрерывного ряда вторичных источников.

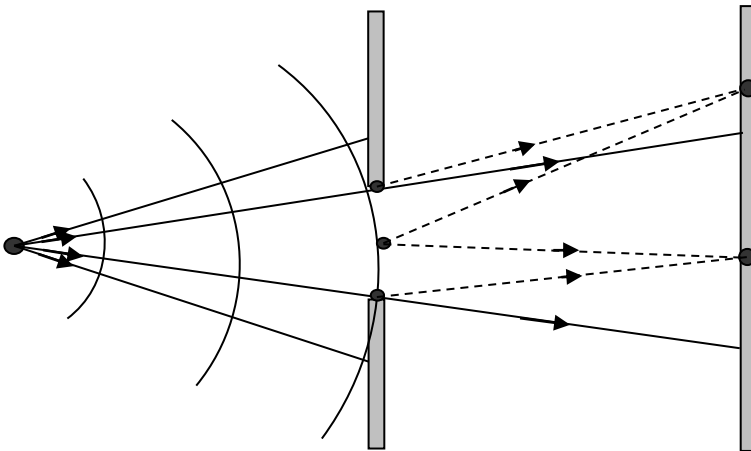
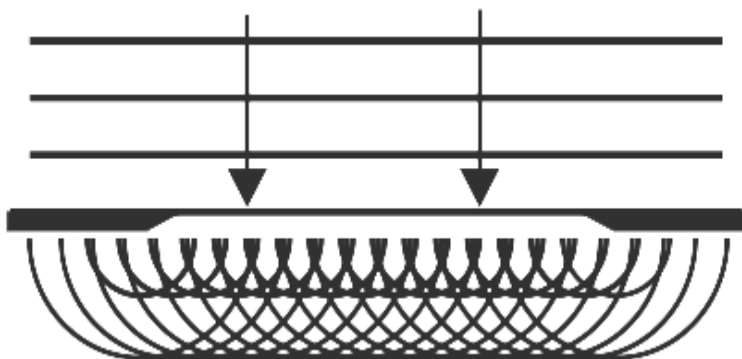


Рис. 1. Явление дифракции на отверстии (щели)

Новый волновой фронт прошедшей волны строится в соответствии с **принципом Гюйгенса**, согласно которому всякая точка среды, до которой дошло возмущение, является источником вторичных сферических волн. Как известно такие точки среды образуют исходный волновой фронт. Следовательно, вид нового волнового фронта будет зависеть от вида исходного фронта и оптических свойств среды, в которой распространяется свет. Если среда, в которой распространяется свет, оптически однородна и изотропна то новый волновой фронт полностью будет повторять вид исходного. Если же в пространстве существуют неоднородности, то новый волновой фронт может существенно отличаться от исходного. Так, например, при нормальном падении плоскопараллельного пучка света на отверстие исходный волновой фронт представляет собой отрезок по ширине отверстия. Если от каждой точки этого волнового фронта (в том числе и на краях отверстия) построить полусферы одинакового радиуса и провести огибающую, то будет видно, что края нового волнового фронта выходят за края отверстия (рис. 2), то есть свет его огибает и должно иметь место явление дифракции.



**Рис. 2.** Принцип Гюйгенса при дифракции на отверстии (щели)

Интенсивность в каждой точке на экране где наблюдается дифракционная картина можно определить с помощью **принципа Френеля**. Френель показал, что интенсивность и соответствующий ей световой вектор  $dE$  в некоторой точке пространства зависит от

угла между нормалью к исходному волновому фронту  $\varphi$ , расстояния от поверхности этого волнового фронта до точки наблюдения  $r$ , величины площади поверхности с которой происходит излучение  $dS$ , а также амплитуды  $A$  и фазы  $(\omega \cdot t - \vec{k}\vec{r} + \alpha_0)$  исходной волны:

$$dE = K(\varphi) \frac{AdS}{r} \cos(\omega \cdot t - \vec{k}\vec{r} + \alpha_0) \quad (1)$$

При этом результирующая амплитуда от всей поверхности согласно принципу Гюйгенса–Френеля будет определяться соотношением:

$$E = \int_s K(\varphi) \frac{AdS}{r} \cos(\omega \cdot t - \vec{k}\vec{r} + \alpha_0) \quad (2)$$

Используя принцип Френеля можно предсказать появление в той или иной точке пространства **дифракционного максимума или минимума** (рис. 1).

**Принцип Гюйгенса-Френеля** дает достаточную информацию о дифракции, хотя она не является полной и обладает рядом недостатков, которые в данном курсе не рассматриваются.

Различают два вида **дифракции**:

1. дифракция **Фраунгофера**;
2. дифракция **Френеля**.

**Дифракция Фраунгофера** или, как ее еще называют, дифракция в параллельных лучах наблюдается тогда, когда экран и источник находятся от оптической неоднородности (препятствия) на достаточно большом расстоянии, для которого падающие на препятствие лучи можно считать плоскопараллельными. Дифракцию Фраунгофера можно осуществить и для малых расстояний, поместив две собирающие линзы таким образом, чтобы в их фокальных плоскостях располагались и источник, и экран.

**Дифракция Френеля** наблюдается во всех других случаях, пока для световых лучей выполняются условия отклонения от законов геометрической оптики.

В оптике существует **критерий**, по которому можно определить **вид дифракции**. Он зависит от длины падающей световой волны  $\lambda$ , поперечных размеров неоднородности  $b$  и расстояния от препятствия до экрана  $l$ . Этот критерий имеет вид:

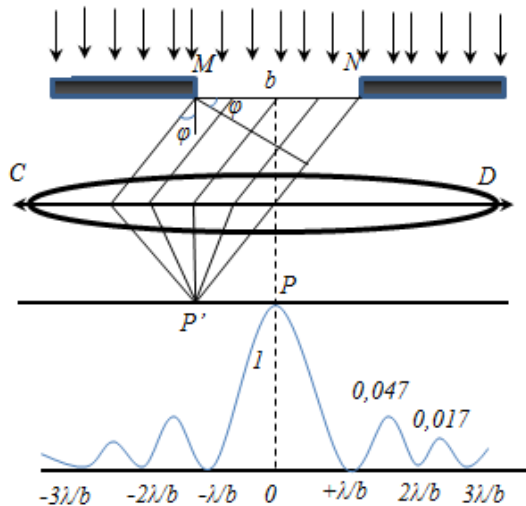
$\frac{b^2}{\lambda \cdot l} \ll 1$  - дифракция Фраунгофера;

$\frac{b^2}{\lambda \cdot l} \approx 1$  - дифракция Френеля;

$\frac{b^2}{\lambda \cdot l} \gg 1$  - геометрическая оптика.

При падении плоскопараллельного пучка на щель возникает **дифракция Фраунгофера**. Дифракционная картина наблюдается на экране, помещенном в фокальной плоскости собирающей линзы, поэтому представляет систему чередующихся светлых и темных колец.

В центре дифракционной картины всегда будет располагаться максимум, интенсивность которого во много раз превосходит интенсивность всех последующих максимумов. Это объясняется тем, что колебания от всех элементарных зон, на которые разбивается щель, приходят **в одной фазе**. При этом **дифракционная картина** будет **симметрична** относительно центра линзы.



**Рис. 3.** Дифракция Фраунгофера на щели с распределением интенсивности по углам дифракции

В случае дифракции Фраунгофера модуль комплексной амплитуды и интенсивность результирующего колебания будут определяться по формулам:

$$A_{\varphi} = A_0 \frac{\sin(\pi b \sin \varphi / \lambda)}{\pi b \sin \varphi / \lambda} \quad (3)$$

$$I_{\varphi} = I_0 \frac{\sin^2(\pi b \sin \varphi / \lambda)}{(\pi b \sin \varphi / \lambda)^2} \quad (3)$$

где  $A_0$  – начальная амплитуда плоскопараллельного пучка,  $b$  – ширина щели, а  $I_0$  – начальная интенсивность плоскопараллельного пучка

В случае щели условие наблюдения дифракционных минимумов при дифракции Фраунгофера имеет вид:

$$b \sin \varphi = \pm m \lambda \quad (5)$$

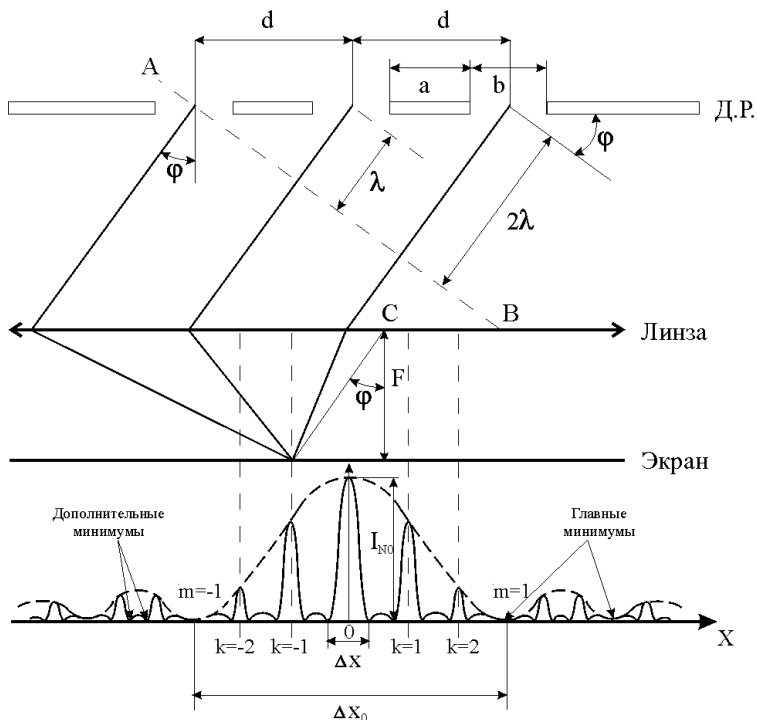
где  $m$  - порядок дифракции.

Если сместить щель параллельно экрану, то дифракционная картина останется неподвижной. Если сместить линзу таким же образом, то картина изменит свое положение на экране. Количество минимумов интенсивности определяется отношением ширины щели  $b$  к длине волны  $\lambda$ . При ширине щели, меньшей длины волны, дифракционные минимумы вообще не возникают. В этом случае интенсивность света монотонно убывает от середины картины к ее краям.

Простейшим прибором, с помощью которого можно наблюдать дифракционную картину является **дифракционная решетка**. Она представляет собой тонкую металлическую или стеклянную пластинку, на которую с определенной периодичностью нанесены штрихи равной глубины ( $N$  - число штрихов на дифракционной решетке).

**Периодом решетки**  $d$  называют минимальное расстояние между центрами ее штрихов:

$$d = a + b \quad (6)$$



**Рис. 4.** Дифракция на дифракционной решетке с распределением интенсивности по углам дифракции

Дифракционная решетка позволяет наблюдать дифракцию как в отраженном (металлическая), так и проходящем (стеклянная) свете. Картина перераспределения интенсивностей для такой решетки образована как за счет интерференции краевых лучей, идущих от двух соседних щелей, так и за счет дифракции Фраунгофера на щели (рис. 4).

Поэтому условие максимумов и минимумов дифракционной решетки отличаются от условий для одной щели (см. формула дифракционной решетки). Другие значения будут иметь и результирующая амплитуда и результирующая интенсивность в зависимости от угла дифракции  $\varphi$ .

**Углом дифракции  $\varphi$**  называют угол, на который отклоняются лучи при прохождении через щель вследствие явления дифракции.

**Формула дифракционной решетки** позволяет по дифракционной картине определить с высокой точностью длину волны падающего излучения:

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda \quad (7)$$

где  $k$  - порядок главного максимума дифракционного спектра, а  $d$  - постоянная дифракционной решетки.

Интенсивность от дифракционной решетки в  $N^2$  раз превосходит интенсивность от одной щели для того же угла дифракции, а результирующая амплитуда - в  $N$  раз. Ниже даны распределения результирующих амплитуд и интенсивностей на дифракционной картине решетки по углам дифракции:

$$A_{\text{реш}} = A_{\varphi} \frac{\sin(N\delta/2)}{\sin(\delta/2)} \quad (8)$$

$$I_{\text{реш}} = I_{\varphi} \frac{\sin^2(N\delta/2)}{\sin^2(\delta/2)} \quad (9)$$

где  $N$  - число щелей дифракционной решетки,  $\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \varphi$  - разность фаз между соседними краевыми лучами от различных щелей.

Белый свет, падая на дифракционную решетку, разлагается на монохроматические составляющие, как и в случае дисперсии. Однако такое разложение света связано с тем, что каждой длине волны соответствует свой угол дифракции. Причем центральный максимум дифракционной картины не окрашен, так как образован прямыми лучами, проходящими через щель. Все остальные максимумы разложатся в спектр, фиолетовый конец которого обращен к центру дифракционной картины, а красный наружу. В этом отношении дифракционную решетку можно назвать **спектральным прибором**. В отличие от стеклянной призмы дифракционная решетка сильнее отклоняет красные лучи и слабее – фиолетовые.

**Основными характеристиками** всякого **спектрального прибора** являются его дисперсия и разрешающая сила.

**Разрешающая сила  $R$  дифракционной решетки** пропорциональна порядку спектра  $k$  и числу щелей  $N$  и определяется соотношением:

$$R = kN \quad (10)$$

**Угловая дисперсия  $D$  дифракционной решетки** пропорциональна порядку спектра  $k$  и обратно пропорциональна периоду решетки  $d$ . Формула для расчета угловой дисперсии имеет при этом вид:

$$D \approx \frac{k}{d} \quad (11)$$

**Линейная дисперсия  $D_{\text{лин}}$  дифракционной решетки** равна произведению угловой дисперсии  $D$  на фокусное расстояние линзы  $f'$ , собирающей на экране световые лучи после дифракции:

$$D_{\text{лин}} \approx f' \frac{k}{d} \quad (12)$$

Дифракционные решетки делятся на **прозрачные** и **отражательные**. **Прозрачные решетки** изготавливаются из стеклянных или кварцевых пластинок, на поверхность которых с помощью специальной машины алмазным резцом наносится ряд параллельных штрихов. Промежутки между штрихами служат щелями. Для **отражательных решеток** штрихи наносятся алмазным резцом на поверхность металлического зеркала. Свет падает на отражательную решетку наклонно. При этом решетка с периодом  $d$  действует так, как при нормальном падении света действовала бы решетка с периодом  $d \cos \theta$ , где  $\theta$  - угол падения света.

Решение задачи дифракции заключается в нахождении распределения освещенности на экране в зависимости от размеров и формы препятствий или отверстий.

Для того, чтобы определить число наблюдаемых главных дифракционных максимумов нужно выразить в (7) синус и учесть, что он не должен быть больше единицы:

$$\sin \varphi = \frac{k\lambda}{d} \leq 1 \quad (13)$$

Как видно из данного неравенства предельное значение достигается при  $\sin \varphi = 1$ .

Если положение точек на экране, в которых наблюдается максимум одного порядка, обозначить как  $x_k$  и учесть что угол дифракции Фраунгофера параксиальный  $x_k \ll l$ , то можно получить следующее выражение:

$$\sin \varphi = \operatorname{tg} \varphi = \frac{x_k}{2l} \quad (14)$$

Сравним значение синусов в (13) и (14) и получим расчетную формулу для данной работы:

$$\frac{x_k}{2l} = \frac{k\lambda}{d} \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{x_k d}{2lk} \quad (16)$$

Установка, используемая в работе, схематично изображена на рис. 5:



Рис. 5. Схема используемой установки с дифракционной решеткой

Когерентное излучение от лазера нормально падает на прозрачную дифракционную решетку. В результате дифракции на решетке на экране образуются главные дифракционные максимумы. Наиболее заметны максимумы до третьего порядка включительно. Расстояние от решетки до экрана должно быть достаточно большим. На экране измеряют расстояние между максимумами одного порядка с помощью линейки.

## ХОД РАБОТЫ

1. Включить газовый оптический квантовый генератор в сеть.
2. Установить дифракционную решетку и экран так, чтобы на экране получилось четкое изображение центральной полосы и полос 1-го порядка.
3. Измерить расстояние от экрана до дифракционной решетки  $l$ .
4. Измерить линейкой на экране расстояние между серединами полос 1-го порядка -  $x_1$ .
5. Таким же способом измерить расстояние  $x_2$  и  $x_3$  для полос 2-го и 3-го порядков.
6. Полученные значения  $l$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  подставить в формулу (16) и определить длину световой волны. Постоянная дифракционной решетки  $d = 0,01$  мм.
7. Измерения произвести для трех разных положений дифракционной решетки от экрана.
8. Все полученные измерения и вычисления занести в таблицу ниже.

**Таблица**

k	Данные наблюдений			Результаты вычислений			Табличное значение $\lambda, \text{ м}$
	$x, \text{ м}$	$l, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$\lambda, \text{ м}$	$\Delta\lambda, \text{ м}$	$\varepsilon, \%$	
1							
2							
3							
Среднее значение.							
1							
2							
3							
Среднее значение.							
1							
2							
3							
Среднее значение							

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА

1. В чем состоит явление дифракции?
2. В чем заключается принцип Гюйгенса-Френеля?
3. Какие выделяют виды дифракции и при каких условиях они наблюдаются? Приведите критерии.
4. Объясните, как происходит дифракция от одной щели.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой дифракционная решетка? Какие виды дифракционных решеток бывают?
2. Напишите формулу дифракционной решетки.
3. Объясните, почему решетка является спектральным прибором? Назовите основные характеристики решетки как спектрального прибора и запишите расчетные формулы для них.
4. Получите и запишите формулу для экспериментального определения длины волны света при помощи дифракционной решетки.
5. В чем состоит различие между спектрами, полученными при помощи призмы и дифракционной решетки.
6. Дайте краткое описание используемой в работе установки.

## Лабораторная работа 4.10

### Тема: ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА

**Цель:** экспериментальная проверка закона Малюса.

**Приборы и принадлежности:** поляроиды, источник света, фотозащитный экран, люксметр.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Каждый отдельный атом или молекула испускают свет, который является поляризованным, то есть колебания вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  электромагнитной волны определенным образом ориентированы в пространстве. Однако реальные источники света состоят из большого числа молекул и атомов, моменты актов испускания света и пространственные ориентации векторов  $\vec{E}$  которых распределены хаотически. Поэтому в общем световом потоке направление вектора напряженности  $\vec{E}$  от каждого атома или молекулы источника произвольно в каждый момент времени. Подобное излучение называется неполяризованным, или **естественным светом**.

В отличие от естественного **поляризованным** называется свет, у которого направления колебаний напряженности электрического поля определены каким-либо образом. **Поляризация света** - это его волновое свойство, обусловленное поперечностью электромагнитных волн. Поперечность световых волн вытекает из особенностей системы уравнения Максвелла и показывает, что бегущая электромагнитная волна представляет собой колебания векторов электрического и магнитного поля в двух взаимных плоскостях в одной фазе, распространяющиеся в пространстве в направлении перпендикулярном этим векторам.

Принято различать: **плоско-поляризованный свет** (линейная поляризация) **циркулярно-поляризованный** (круговая поляризация) и **эллиптически поляризованный свет**.

**Плоско-поляризованный свет** – свет, колебания светового вектора которого  $\vec{E}$  происходят в одной плоскости, проходящей через луч.

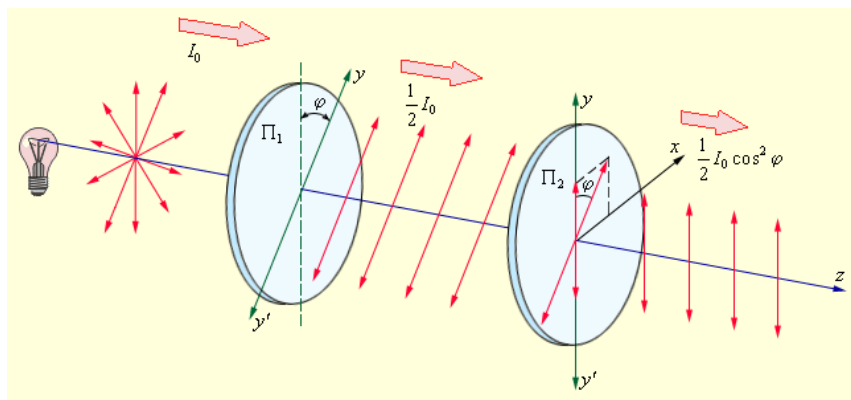
**Циркулярно-поляризованный свет** – свет, при распространении которого конец вектора  $\vec{E}$  описывает окружность в плоскости, перпендикулярной направлению распространения.

**Эллиптически поляризованный свет** – свет, при распространении которого конец вектора  $\vec{E}$  описывает эллипс.

Примером линейно-поляризованного света является излучение лазера (оно, как известно, является когерентным).

С помощью специальных устройств - поляризаторов можно легко получить поляризованный свет из естественного. Основное свойство таких устройств заключается в том, что они могут пропускать световые волны, электрический вектор напряженности которых колеблется лишь в строго определенных направлениях (рис. 1):  $yy'$  – разрешенные направления поляроидов;  $z$  – главное направление

Поляризаторы – это анизотропные по отношению к оптическим свойствам среды. В анизотропных средах физические свойства зависят от выбора направления. В природе существуют оптически анизотропные кристаллы (кварц, турмалин, исландский шпат, гипс и др.), в которых наблюдается **явление двойного лучепреломления**. Оно состоит в том, что при падении на кристалл естественного света он разделяется на два преломленных луча, один из которых называется обыкновенным, а другой – необыкновенным. Первый луч подчиняется закону преломления, второй – не подчиняется этому закону. Каждый из этих лучей распространяется в кристалле со своей фазовой скоростью  $v_o$  – для обыкновенного луча и  $v_e$  – для необыкновенного луча. Причем, в общем случае:  $v_o \neq v_e$ . Все кристаллы делятся на одноосные и двуосные.



**Рис. 1.** Прохождение естественного света через два идеальных поляроида

**Оптической осью кристалла** называется направление в кристалле, в котором отсутствует явление двойного лучепреломления (в этом направлении  $v_o = v_e$ ). Если для такого кристалла справедливо соотношение  $n_e > n_o$ , то кристалл называется положительным, если  $n_e < n_o$ , то – отрицательным.

**Главной плоскостью кристалла** называется плоскость, в которой находятся оптическая ось кристалла и падающий луч. Если на одноосный кристалл падает естественный свет, то на выходе из него обыкновенный и необыкновенный лучи поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях.

В настоящей работе для получения и исследования линейно-поляризованного света применяются поляроиды. Они изготавливаются из очень мелких кристаллов турмалина или геропатита (сернокислого йод-хинина), нанесенных на целлулоидную пленку. Оптические оси всех кристалликов специальным способом ориентируют в одном направлении. Кристаллы геропатита почти полностью поглощают обыкновенный луч. Таким образом, падающий естественный свет, проходя сквозь поляроид, становится плоско-поляризованным.

Рассмотрим установку (рис. 2), состоящую из источника света  $S$ , двух поляроидов  $P$  и  $A$  и фотоэлемента.

Пройдя сквозь первый поляроид  $P$  (поляризатор), естественный свет от источника становится плоско-поляризованным. При этом его интенсивность уменьшается в два раза по сравнению с интенсивностью естественного света. Второй поляроид  $A$  (анализатор) может пропускать только те колебания, которые совпадают с его главным направлением  $AA$ . Если главное направление поляризатора и анализатора совпадают, то интенсивность проходящего света будет максимальной. Если же анализатор повернуть таким образом, что его главное направление составляет угол  $90^0$  с главным направлением поляризатора, то интенсивность проходящего света будет равно 0. Такое положение поляроидов называется скрещенным.

В том случае, когда главные направления поляроидов составляют между собой некоторый угол  $\varphi$ , интенсивность проходящего света будет принимать промежуточные значения.

Найдем зависимость между интенсивностью  $J$  и углом  $\varphi$ .

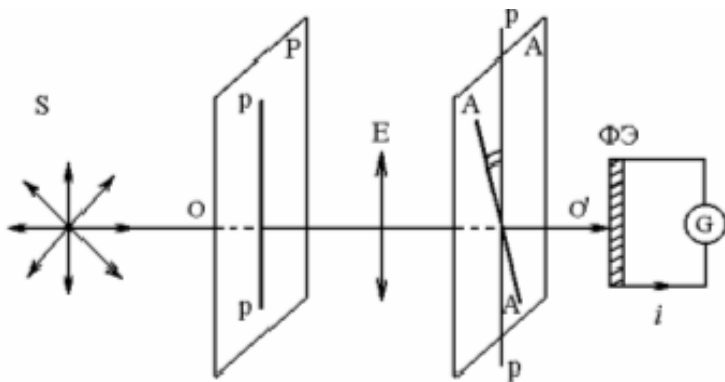


Рис. 2. Система поляризатора-анализатора

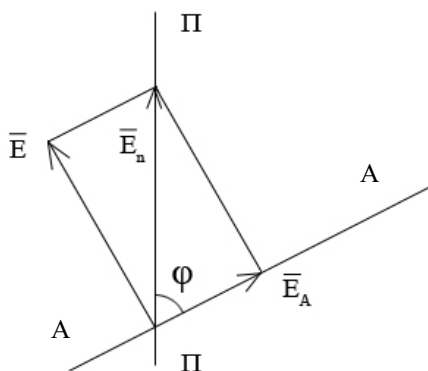
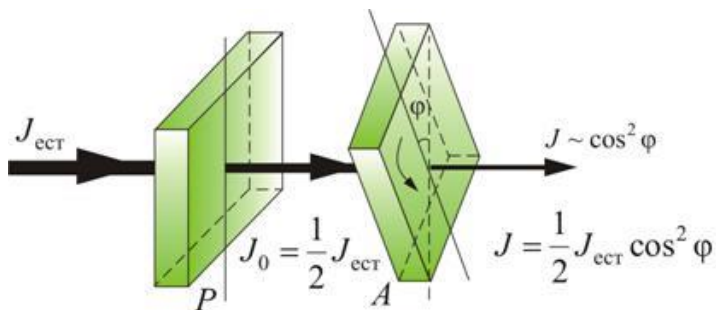


Рис. 3. Амплитудная диаграмма для напряженностей света прошедших через систему анализатор-поляризатор

Пусть  $E_n$  (рис. 3) – амплитуда вектора напряженности колебания, пропускается поляризатором; АА – главное направление анализатора. Амплитуду  $E_n$  можно разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие  $E_A$  и  $E$ , одна из которых совпадает с главным направлением анализатора. Колебания, перпендикулярные направлению АА, не проходят через анализатор. Из рис. 2 следует, что амплитуда выходящего из анализатора света равна:

$$E_A = E_n \cdot \cos \varphi \quad (1)$$

Так как интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды, то:

$$J = J_0 \cdot \cos^2 \varphi \quad (2)$$

где  $J_0$  – интенсивность прошедшего света через систему анализатор – поляризатор при угле между главными направлениями равно нулю.

Соотношение (2) представляет собой **закон Малюса**. Согласно этому закону интенсивность поляризованного света, падающего на анализатор, таким образом, что плоскость поляризации этого вектора составляет угол  $\varphi$  с его главным направлением, уменьшается пропорционально квадрату косинуса этого угла.

### ХОД РАБОТЫ

1. Перед фотоэлементом необходимо установить деполаризатор - матовую стеклянную пластинку, так как величина фототока зависит от направления плоскости колебаний вектора  $\vec{E}$  в световом луче, падающем на фотоэлемент.

2. Установить лимб анализатора в нулевое положение.

3. Вращая анализатор, добиться максимального отклонения стрелки люксметра. Записать деление на лимбе анализатора – величину угла  $\varphi_0 = 0$  и показание люксметра  $i_0$ .

4. Повернуть анализатор на  $20^0$  и повторить опыт, записывая показание  $\varphi_1 = 20^0$  и показание люксметра  $i_1$ .

5. Измерения повторяют до  $360^0$  через каждые  $20^0$ .

6. Полученные данные занести в таблицу 1.

7. Построить график зависимости силы фототока  $i$ , который пропорционален интенсивности  $J$  проходящего света, от квадрата

косинуса угла поворота  $\varphi$  в полярных координатах, используя формулу:

$$i = f(\varphi) \quad (3)$$

8. Оценить погрешность эксперимента для углов  $\varphi = 0; \pi/6; \pi/4$ .

**Таблица 1**

№ п/п	$\varphi$ , град.	$\cos \varphi$	$\cos^2 \varphi$	$i$	№ п/п	$\varphi$ , град.	$\cos \varphi$	$\cos^2 \varphi$	$i$
1	0				11	180			
2	20				12	200			
3	40				13	220			
4	60				14	240			
5	80				15	260			
6	90				16	280			
7	100				17	300			
8	120				18	320			
9	140				19	340			
10	160				20	360			

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА

1. Какой свет называется плоско-поляризованным?
2. Чем отличается естественный свет от плоско-поляризованного?
3. Могут ли продольные волны быть плоско-поляризованными? Почему?
4. Какие виды поляризации света существуют? Дайте им определения.
5. В чем состоит суть явления двойного лучепреломления?
6. Как поляризованы по отношению друг другу обыкновенный и необыкновенный луч?

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего применяются и что представляют собой поляроиды?
2. Что называют главной плоскостью и оптической осью кристалла?

3. Что происходит с естественным светом при прохождении через систему поляризатор-анализатор?
4. При каком условии интенсивность света, прошедшего через систему поляризатор –анализатор будет равна нулю?
5. Сформулируйте закон Малюса.
6. Получите и запишите соотношение для закона Малюса и поясните его.

## ЛИТЕРАТУРА

### **Основная литература:**

1. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Академия, 2016.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. II. - М.: Лань, 2016.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.III. - М.: Физматлит, 2015.
4. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Академия, 2015.
5. Иверонов В.И. Физический практикум. - М.: Наука, 1967.
6. Кортнев А.В. Практикум по физике. - М.: Высшая школа, 1965.

### **Дополнительная литература:**

1. Матвеев А.Н. Оптика. М., Высшая школа, 1985.
2. Яворский Б.М. Курс физики II т.- М.: Высшая школа, 1997.
3. Ландсберг Г.С. Оптика.- М.: Высшая школа, 1976.
4. Авдусь З.И. Практикум по общей физике. - М.: Просвещение, 1971.
5. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Т. I-III.- М.: Лань, 2007.

ВЫПОЛНЕНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ  
ПО РАЗДЕЛУ «ОПТИКА» КУРСА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

*Методические рекомендации*

*Составители:*

**Е.И. Брусенская,  
Р.А. Хамидуллин  
В.Н. Чебан**

ИЛ № 06150. Сер. АЮ от 21.02.02.

Подписано в печать . .24. Формат 60 × 90/16.

Усл. печ. л. 7,0. Электронное издание. Заказ №

*Изд-во Приднестр. ун-та. 3300, г. Тирасполь, ул. Мира, 18.*