



МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный гуманитарно-  
педагогический университет»

**О.Н. Бочкарева, Л.А. Песин**  
**ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ**  
**ОПТИКА**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

Челябинск  
2020

УДК 535 (021)

ББК 22.34 я 73

Б 86

**Бочкарева, О.Н.** Физический практикум. Оптика: учебно-методическое пособие / О.Н. Бочкарева, Л.А. Песин. – Челябинск: Изд-во Южно-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2020. – 105 с.

ISBN

Учебно-методическое пособие по оптике, как части курса общей и экспериментальной физики, составлено с учетом того, что после этого курса студентам будут предложены дисциплины теоретической физики, поэтому больше внимания уделяется экспериментальным обоснованиям физических законов и теорий, исключены громоздкие теоретические доказательства. Пособие содержит описания лабораторных работ по основам геометрической и волновой оптики, подборку теоретического материала и контрольных вопросов для самостоятельной работы студентов по подготовке к проведению лабораторного практикума по курсу общей и экспериментальной физики (оптика). Данное пособие направлено на формирование у студентов широкого спектра умений, необходимых для профессиональной деятельности будущего учителя физики.

Пособие предназначено для студентов направления подготовки 44.03.01 и 44.03.05 Педагогическое образование.

Рецензенты: И.И. Беспаль, канд. физ.-мат. наук  
Н.А. Векессер, канд. физ.-мат. наук

ISBN

© О.Н. Бочкарева, Л.А. Песин, 2020  
© Издательство Южно-Уральского  
государственного гуманитарно-  
педагогического университета, 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА МАКСВЕЛЛА. ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН	13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОСВЕЩЕННОСТИ	16
Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы 1	16
Контрольные вопросы к лабораторной работе 1	19
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ СОБИРАЮЩЕЙ И РАССЕИВАЮЩЕЙ ЛИНЗЫ	20
Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы 2	20
Контрольные вопросы к лабораторной работе 2	30
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ОПТИЧЕСКОЙ СИЛЫ ЛИНЗЫ С ЕЕ ФОРМОЙ	31
Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы 3	31
Контрольные вопросы к лабораторной работе 3	34
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАРДИНАЛЬНЫХ ТОЧЕК И ПЛОСКОСТЕЙ ЛИНЗ И ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	36
Контрольные вопросы к лабораторной работе 4	42
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. ИЗУЧЕНИЕ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ	43
Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы 5	43
Контрольные вопросы к лабораторной работе 5	51
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСКОПА	52
Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы 6	52
Контрольные вопросы к лабораторной работе 6	57

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ И ЖИДКИХ ТЕЛ	58
Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы 7	58
Контрольные вопросы к лабораторной работе 7	65
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСОВ КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ И ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ МЕТОДОМ КОЛЕЦ НЬЮТОНА	66
Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы 8	71
Контрольные вопросы к лабораторной работе 8	71
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ	72
Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы 9	72
Контрольные вопросы к лабораторной работе 9	78
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10. ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА	79
Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы 10	79
Контрольные вопросы к лабораторной работе 10	91
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11. ИЗУЧЕНИЕ ДИСПЕРСИИ СВЕТА	92
Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы 11	95
Контрольные вопросы к лабораторной работе 11	95
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 12. ИЗУЧЕНИЕ ДИСПЕРСИОННОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРИЗМЫ	96
Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы 12	96
Контрольные вопросы к лабораторной работе	112
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	113

## ВВЕДЕНИЕ

Оптика (от др.-греч. *ὀπτική*, *optike'* – появление или взгляд) – раздел физики, в котором изучаются световые явления и законы, связанные с распространением электромагнитных волн преимущественно видимого и близких к нему диапазонов (инфракрасное и ультрафиолетовое излучение), взаимодействие света с веществом, физическая природа света. Оптика описывает свойства света и объясняет связанные с ним явления. Несмотря на свою многовековую историю, она до сих пор интенсивно развивается, обогащаясь все новыми открытиями законов и явлений. Происходит это развитие благодаря тесной связи оптических явлений со строением кристаллических и аморфных веществ и отдельных атомов. Благодаря этой связи современная оптика позволяет получить фундаментальное понимание строения вещества и свойств материи. Кроме того, методы оптики используются во многих прикладных дисциплинах, включая электронику, спектроскопию, химические технологии, силовую микроскопию, фотографию, видео- и киносъёмку, криминалистику, медицину (в частности, офтальмологию). В этих, а также в междисциплинарных сферах, например, в биологии и материаловедении, широко применяются достижения прикладной оптики. Вместе с точной механикой оптика является основой оптико-механической промышленности. Значительных успехов оптика достигла с изобретением

лазеров. Это новый раздел физики – оптика, рожденная лазером, т.е. нелинейная оптика.

Оптика оказалась одним из первых разделов физики, где проявилась ограниченность классических представлений о природе: выявлена двойственная природа света (корпускулярно-волновой дуализм). Корпускулярная теория, берущая начало от И. Ньютона, рассматривает свет как поток частиц (квантов света или фотонов). В соответствии с идеей М. Планка любое излучение происходит дискретно, причём минимальная порция энергии (энергия фотона) имеет величину  $\varepsilon = h\nu$ , где  $\nu$  – частота света, а  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж\*с – постоянная Планка. Использование представлений о свете как потоке частиц объясняет явление фотоэффекта и закономерности теплового излучения.

Волновая теория света, берущая начало от Х. Гюйгенса, рассматривает свет как совокупность поперечных монохроматических электромагнитных волн, а наблюдаемые оптические эффекты как результат сложения (интерференции) этих волн. При этом считается, что в отсутствие перехода энергии излучения в другие виды энергии эти волны не влияют друг на друга в том смысле, что вызвавшая в некоторой области пространства интерференционные явления волна продолжает распространяться дальше без изменения своих характеристик. Волновая теория электромагнитного излучения нашла своё теоретическое описание в работах Максвелла в форме его уравнений. Использование представлений о свете как о волне позволяет объяснить явления, связанные с интерференцией, дифракцией и поляризацией, в том числе структуру светового поля, построение изображений и голографию.

В некоторых явлениях (например, селективный фотоэффект) возможно одновременное проявление и волновых, и корпускулярных свойств света, что свидетельствует об их внутреннем единстве.

### **Историческая справка**

5 в. до н.э. – Пифагор – упоминание о прямолинейном распространении света;

3 в. до н.э. – Эвклид систематически изложил описание опытов и законов распространения света;

1285 г. – Р. Бэкон – изобретение очков;

1590 г. – З. Янсен – изобретение микроскопа;

1609 г. – Г. Галилей – изобретение телескопа;

1620 г. – В. Снеллиус – количественная формулировка закона преломления света (современный вид – Р. Декарт 1637 г.);

#### **ВЕЛИКИЕ ОТКРЫТИЯ XVII в.**

1665 г. – Ф. Гримальди – дифракция света;

1665 г. – Р. Гук – интерференция света;

1666 г. – И. Ньютон – дисперсия света;

1669 г. – Э. Бартолин – двойное лучепреломление;

1678 г. – Х. Гюйгенс – поляризация света.

Конец XVII в.:

- И. Ньютон объяснил закон отражения и попытался объяснить закон преломления света на основе корпускулярных представлений;

- Х. Гюйгенс объяснил законы отражения и преломления света на основе волновых представлений. Волна – это распространение колебаний в материальной среде. Волновой поверхностью называется геометрическое

место точек среды, колеблющихся в одной фазе. Фронт волны – это волновая поверхность, максимально удалённая от источника колебаний, фактически граница, разделяющая колеблющиеся точки среды от находящихся в данный момент времени в покое. Распространение волны в пространстве происходит за счёт вторичных волн, возникающих в результате взаимодействия между материальными объектами вблизи фронта волны с обеих его сторон.

**Принцип Х. Гюйгенса:** каждая точка волнового фронта первичной волны является источником вторичных волн. Вторичные волны – это колебания, возникшие в тех точках среды, которые ранее находились в покое. Поверхность, огибающая в некоторый последующий момент времени эти вторичные волны, является новым фронтом распространяющейся волны (рис. 1).

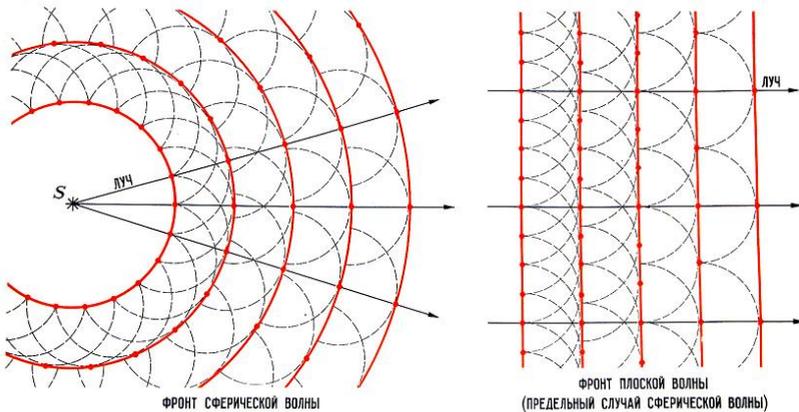


Рис. 1. Фронт распространяющейся волны

На основе принципа Гюйгенса возможно доказать закон преломления света.

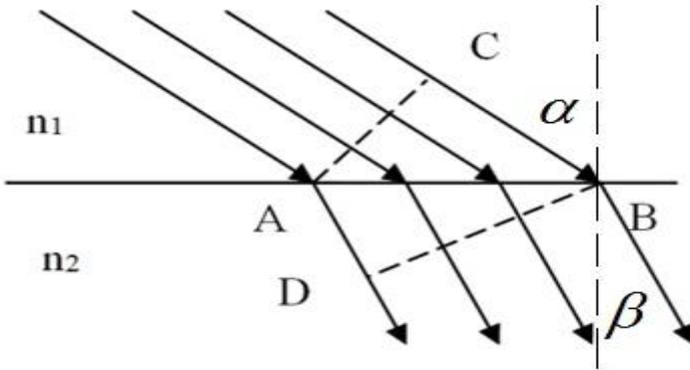


Рис. 2. Преломление света на границе двух сред

Рассмотрим рисунок 2: из среды с показателем преломления  $n_1$  в среду с показателем  $n_2$  переходит световая волна.  $AC$  – положение волнового фронта в первой среде в момент, когда волна в т. А входит во вторую среду. Расстояние  $CB$  волна в первой среде проходит со скоростью  $v_1$  за время  $t$ , таким образом,  $CB = v_1 t$ , за это же время во второй среде волна распространится со скоростью  $v_2$  на расстояние  $AD = v_2 t$ .  $BD$  – положение волнового фронта во второй среде через время  $t$ . Из рисунка следует, что угол  $CAB$  равен углу падения  $\alpha$ , угол  $ABD$  равен углу преломления  $\beta$ , углы  $ACB = ADB = 90^\circ$ . Из  $\triangle ACB$  отрезок  $AB = CB/\sin\alpha$ , а из  $\triangle ADB$  отрезок  $AB = AD/\sin\beta$ . Приравняем правые части и получим:

$$\frac{CB}{\sin\alpha} = \frac{AD}{\sin\beta}$$

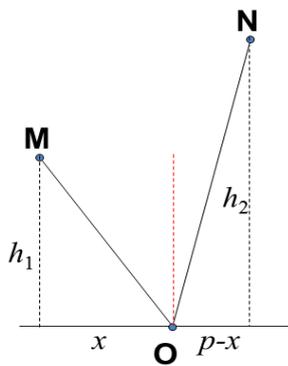
$\frac{v_1 \tau}{\sin \alpha} = \frac{v_2 \tau}{\sin \beta}$ , следовательно, т.к. время  $\tau$  одно и то же,  $\frac{v_1}{\sin \alpha} = \frac{v_2}{\sin \beta}$ , что соответствует экспериментальным данным и

закону преломления:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Принцип П. Ферма, установленный французским математиком около 1660 г., также позволяет объяснить законы прямолинейного распространения, отражения и преломления света.

**Принцип П. Ферма:** Действительный путь распространения света (луча) есть путь, для прохождения которого свету требуется минимальное время по сравнению с любым другим мыслимым путём между теми же точками.



то  $t = (MO + ON) / v$

Рассмотрим отражение света от поверхности (рис. 3). Луч из точки M после отражения проходит через точку N. Согласно принципу Ферма время  $t = t_1 + t_2$ , затраченное на прохождение лучом отрезков MO и ON, должно быть наименьшее.

Если свет в данной среде распространяется со скоростью  $v$ ,

Рис. 3. Отражение света (доказательство закона отражения на основе принципа Ферма)

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + h_1^2}}{v} + \frac{\sqrt{(p-x)^2 + h_2^2}}{v}$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{v} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{2x}{\sqrt{x^2 + h_1^2}} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{2(p-x)}{\sqrt{(p-x)^2 + h_2^2}} \right) \right] =$$

$$= \frac{1}{v} (\sin i - \sin i') = 0$$

$\frac{dt}{dx} = 0$ , если  $(\sin i - \sin i') = 0$ , следовательно, угол падения равен углу отражения, что соответствует закону отражения.

Аналогично можно получить закон преломления света на основе принципа Ферма.

Пусть при переходе из среды с показателем преломления  $n_1$  в среду с показателем преломления  $n_2$  свет из т. М в т. N проходит (рис. 4), затратив наименьшее время:  $t = t_1 + t_2 = MO / v_1 + NO / v_2$ .

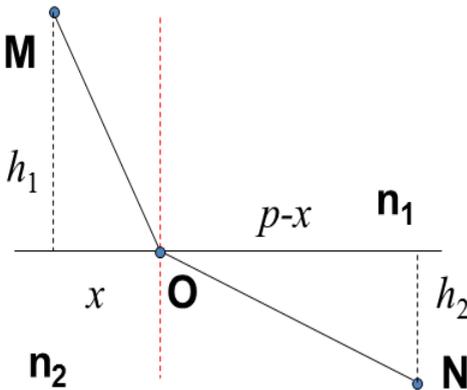


Рис. 4. Преломление света (доказательство закона преломления на основе принципа Ферма)

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + h_1^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{(p-x)^2 + h_2^2}}{v_2}$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{\sin i}{v_1} - \frac{\sin r}{v_2} = 0,$$

Следовательно,  $\frac{\sin i}{v_1} = \frac{\sin r}{v_2}$ , что соответствует закону

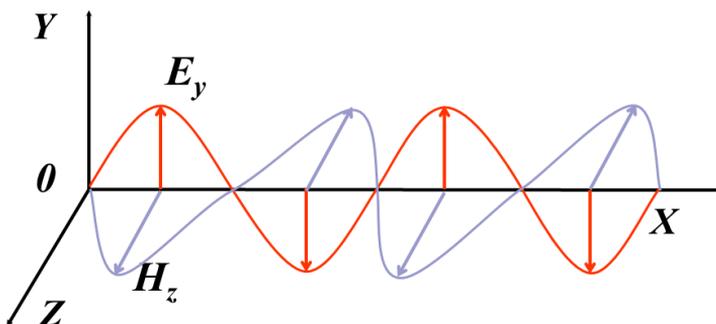
преломления  $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$ .

Из принципа Ферма вытекает обратимость световых лучей: если при переходе MON свет затратил минимальное время, то и время при переходе NOM окажется минимальным.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА МАКСВЕЛЛА.

### ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

В середине 60-х годов XIX века Д. Максвелл сделал вывод о том, что свет – это электромагнитные волны. Этот вывод был сделан на основе совпадения измеренной экспериментально скорости света со скоростью распространения предсказанных Максвеллом электромагнитных волн.



*Рис. 5. «Моментальная фотография»  
плоской электромагнитной волны*

На «моментальной фотографии» (рис. 5) плоской электромагнитной волны (ЭМВ) видно, что векторы  $E$  (напряженность электрического поля) и  $H$  (напряженность магнитного поля) образуют с направлением распространения волны ( $OX$ ) правовинтовую систему.

В пространстве и времени векторы  $E$  и  $H$  изменяются по гармоническому закону:  $E = E_0 \cos(\omega t - kx)$  и  $H = H_0 \cos(\omega t - kx)$ , где  $E_0$  и  $H_0$  – амплитудные значения характеристик поля волны,  $\omega$  – циклическая ча-

стота,  $k = v/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны, направление распространения волны совпадает с координатной осью  $x$ . Скорость распространения ЭМВ определяется по формуле  $v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}}$ , где

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \quad (\text{электрическая постоянная}),$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \quad (\text{магнитная постоянная}).$$

Для прозрачных сред магнитная проницаемость  $\mu$  равна 1, поэтому скорость света в веществе определяется диэлектрической проницаемостью среды  $\varepsilon$ . Соответственно, для вакуума скорость света равна

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Источниками ЭМВ являются атомы и молекулы вещества. Так как излучение отдельными атомами происходит независимо друг от друга, то они дают некогерентное излучение. Каждый источник света излучает определенную совокупность длин волн (частот). Различают спектры излучения трех видов: сплошные (тепловые источники, светодиодные источники), линейчатые (газоразрядные лампы) и полосатые (люминисцентные источники).

Излучение, содержащее колебания с одной определенной частотой, называется монохроматическим. Идеальный монохроматический свет является абстракцией. Выделить из сплошного излучения составляющие с определенной степенью монохроматичности можно за счет пространственного разделения волн различной длины призмами или дифракционными решётками, либо за счёт селективного пропускания с помощью фильтров ( $\Delta\lambda \sim 10$  нм). Наиболее монохроматичное ( $\Delta\lambda \sim 10^6$  нм) и когерентное излучение дают лазеры.

ЭМВ, частоты которых лежат в диапазоне  $7,5-4,3 \cdot 10^{14}$  Гц (или в интервале длин волн 400-700 нм), создают зрительные ощущения и воспринимаются глазом человека как свет. Свет может восприниматься глазом как более яркий или более слабый. Это зависит не только от энергии электромагнитного поля, но и от чувствительности глаза к данному участку спектра. Наибольшей чувствительностью обладает глаз к середине (550 нм) оптического диапазона. Эта чувствительность резко уменьшается при смещении в синюю и красную часть спектра. Данная особенность нашего зрения характеризуется функцией видности (рис. 6).

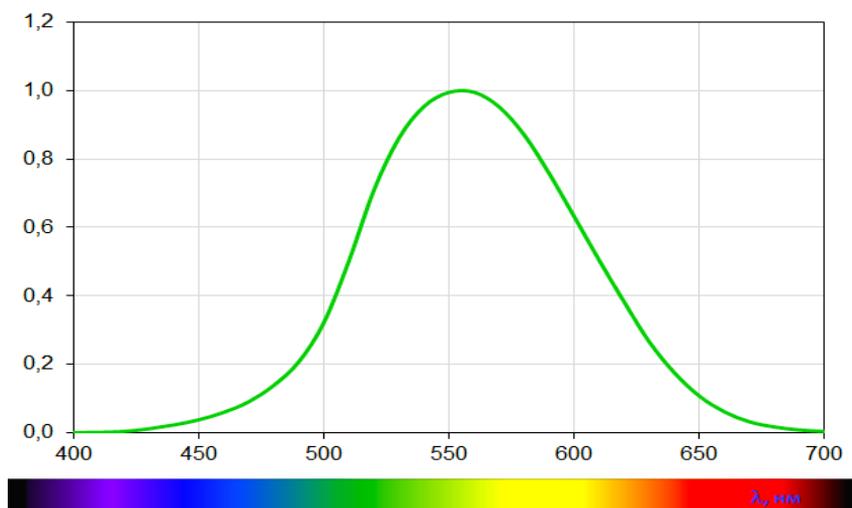


Рис. 6. Функция видности

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОСВЕЩЕННОСТИ

**Оборудование:** объективный фотометр, миллиамперметр, лампа накаливания, выпрямитель.

### **Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы**

1. Основными фотометрическими величинами являются: световой поток ( $\Phi$ ), сила света ( $I$ ), освещенность ( $E$ ), светимость ( $R$ ), яркость ( $B$ ).

Заполните таблицу «Основные фотометрические величины и единицы измерения».

Таблица 1

### **Основные фотометрические величины и единицы измерения**

№	Физическая величина	Что характеризует	Как определяется	Единицы измерения

Используя данные таблицы, дайте определение освещенности и выведите закон освещенности. От каких величин зависит освещенность?

### **2. Ответьте на вопросы:**

1. Чему равен световой поток через сферу, в центре которой находится точечный источник силой света 25 кд (рис. 7)?

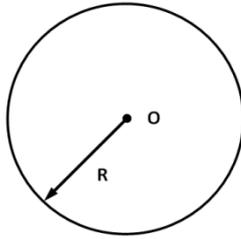


Рис. 7. Световой поток от точечного источника

2. Будет ли одинаковым световой поток через поверхности  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ? Будет ли одинаковой освещенность в точках  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  (рис. 8)?

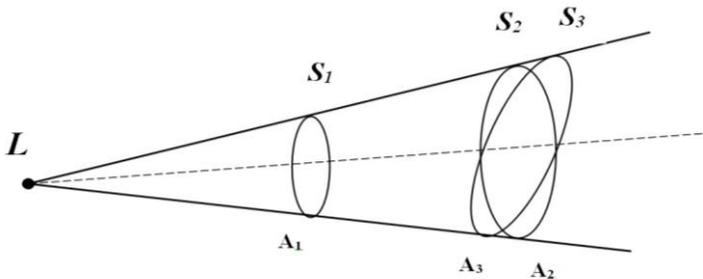


Рис. 8. Световой поток внутри телесного угла

3. Используя кривую видности, ответьте на вопросы:

а) Для какой области спектра и для каких волн функция видности отлична от нуля?

б) В какой области спектра глаза человека обладает максимальной чувствительностью?

в) Рассчитайте поток лучистой энергии, приходящейся на участок спектра с длиной волны  $\lambda_1 = 555$  нм,  $\lambda_2 = 515$  нм,  $\lambda_3 = 600$  нм, соответствующий световому потоку в 1 лм.

### *Описание установки*

Установка представляет собой полый пластмассовый цилиндр, состоящий из неподвижного и подвижного полуцилиндров. В одном конце цилиндра находится фотоэлемент (селеновый) с внутренним фотоэффектом, который при помощи выведенной наружу рукоятки может поворачиваться вокруг горизонтальной оси. Отсчет угла поворота производится по наружной шкале, имеющей деления  $0^\circ$  до  $90^\circ$ .

Фотоэлемент подключается к микроамперметру. Питание лампочки накаливания осуществляется через выпрямитель. Расстояние от фотоэлемента до лампочки накаливания отсчитывается по шкале.

### *Выполнение работы*

1. Определите зависимость освещенности от расстояния между источником света и фотоэлементом. Считая, что сила фототока пропорциональна освещенности ( $E \sim I_\phi$ ), постройте графики зависимости  $I_\phi$  от  $R^{-2}$  для двух различных значений напряжения.

2. Определите зависимость освещенности от угла падения световых лучей. При определенном расстоянии фотоэлемента от лампы накаливания снимите зависимость силы фототока  $I_\phi$  от угла поворота плоскости фотоэлемента вокруг оси через каждые  $15^\circ$ . Опыт повторите при двух различных напряжениях.

3. Постройте графики зависимости силы фототока  $I_\phi$  от  $\cos \alpha$  и сделайте вывод о зависимости освещенности от косинуса угла падения.

4. По графикам проанализируйте зависимость освещенности от расстояния, силы света, угла падения и сделайте вывод о справедливости закона освещенности.

*Контрольные вопросы к лабораторной работе 1*

1. В каких единицах измеряется сила света?
2. Сформулируйте закон освещенности. Что берется за единицу освещенности?
4. Каким прибором и в каких единицах измеряют освещенность?
5. Как пользоваться люксметром?
6. Выпишите из справочника нормы освещенности для учебных помещений. Определите, рабочее место представителей каких профессий требует максимальной освещенности? Почему?
7. Основываясь на законе освещенности, объясните смену времен года на Земле.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ СОБИРАЮЩЕЙ И РАССЕИВАЮЩЕЙ ЛИНЗЫ

**Оборудование:** оптическая скамья, экран, линейка, линза двояковыпуклая, линза двояковогнутая, источник света, предмет.

### **Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы**

*Линза* (нем. Linse, от лат. lens – чечевица) – деталь из оптически прозрачного однородного материала, ограниченная двумя полированными преломляющими поверхностями, например, сферическими или плоской и сферической. В настоящее время всё чаще применяются и «асферические линзы», форма поверхности которых отличается от сферы. В качестве материала линз обычно используются оптические материалы, такие как стекло, оптическое стекло, оптически прозрачные пластмассы и другие материалы. Однако линзы также применяются в СВЧ-технике, и там обычно они состоят из непрозрачных диэлектриков или набора металлических пластин.

### *История*

Возраст самой древней линзы – более 3000 лет, так называемая линза Нимруда. Линза была найдена при раскопках одной из древних столиц Ассирии в Нимруде Остином Генри Лэйардом в 1853 году. Линза имеет форму, близкую к овалу, грубо шлифована, одна из сторон выпуклая, а другая плоская, имеет 3- кратное увеличение. Линза Нимруда представлена в Британском музее.

Первое упоминание о линзах можно найти в древнегреческой пьесе Аристофана «Облака» (424 до н. э.), где с помощью выпуклого стекла и солнечного света добывали огонь. Из произведений Плиния Старшего (23–79 гг. н.э.) следует, что такой способ разжигания огня был известен и в Римской империи – там также описан, возможно,

первый случай применения линз для коррекции зрения – известно, что Нерон смотрел гладиаторские бои через вогнутый изумруд для исправления близорукости.

Сенека (3 г. до н. э.–65 г. н.э.) описал увеличительный эффект, который даёт стеклянный шар, заполненный водой. Арабский математик Альхазен (965–1038 гг. н.э.) написал первый значительный трактат по оптике, описывающий, как хрусталик глаза создаёт изображение на сетчатке. Линзы получили широкое использование лишь с появлением очков примерно в 1280-х годах в Италии.

#### *Характеристики простых линз*

В зависимости от форм различают собирающие (положительные) и рассеивающие (отрицательные) линзы. К группе собирательных линз обычно относят линзы, у которых середина толще их краёв, а к группе рассеивающих – линзы, края которых толще середины. Следует отметить, что это верно, только если показатель преломления у материала линзы больше, чем у окружающей среды. Если показатель преломления линзы меньше, ситуация будет обратной. Например, пузырёк воздуха в воде – двояковыпуклая рассеивающая линза.

Линзы характеризуются, как правило, своей оптической силой (измеряется в диоптриях) и фокусным расстоянием.

Отличительным свойством собирательной линзы является способность собирать падающие на её поверхность лучи в одной точке, расположенной по другую сторону линзы (рис. 8).

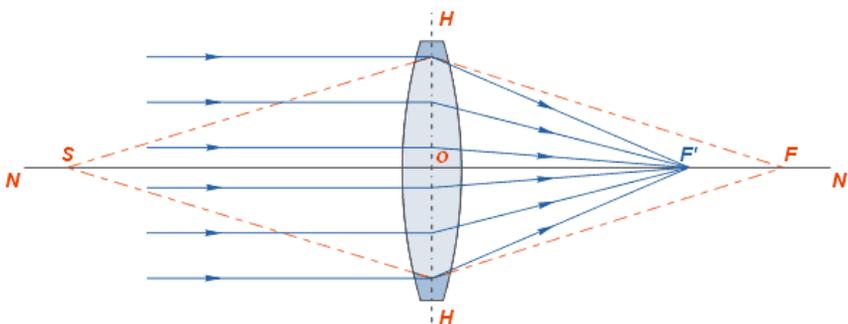


Рис. 8. Собирающая линза

Основные элементы линзы: NN – оптическая ось – прямая линия, проходящая через центры сферических поверхностей, ограничивающих линзу; O – оптический центр – точка, которая у двояковыпуклых или двояковогнутых (с одинаковыми радиусами поверхностей) линз находится на оптической оси внутри линзы (в её центре).

*Примечание.* Ход лучей показан, как в идеализированной (тонкой) линзе, без указания на преломление на реальной границе раздела сред. Дополнительно показан несколько утрированный образ двояковыпуклой линзы.

*Внимание! Рисунок содержит неточность! Постарайтесь её найти.*

*Ход лучей в тонкой линзе*

Линза, для которой толщина принята равной нулю, в оптике называется «тонкой». Для такой линзы показывают не две главных плоскости, а одну, в которой как бы сливаются вместе передняя и задняя.

Рассмотрим построение хода луча произвольного направления в тонкой собирающей линзе. Для этого воспользуемся двумя свойствами тонкой линзы:

- луч, прошедший через оптический центр линзы, не меняет своего направления;
- параллельные лучи, проходящие через линзу, сходятся в фокальной плоскости.

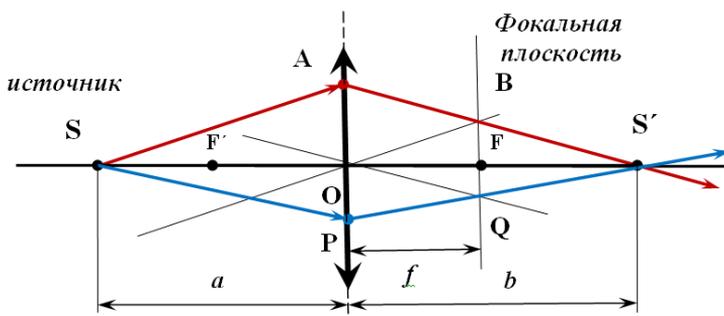


Рис. 9. Ход лучей в собирающей линзе

Рассмотрим луч  $SA$  произвольного направления, падающий на линзу в точке  $A$  (рис. 9). Построим линию его распространения после преломления в линзе. Для этого построим побочную оптическую ось, параллельную  $SA$  и проходящую через оптический центр  $O$  линзы. Побочная оптическая ось  $OB$  пересечёт фокальную плоскость в точке  $B$  – побочном фокусе линзы. Параллельный ей луч  $SA$  после преломления должен пересечь фокальную плоскость в той же точке. Таким образом, после прохождения через линзу луч  $SA$  пойдёт по пути  $AB$  и пересечет главную оптическую ось в т.  $S'$ .

Аналогичным образом можно построить другие лучи, например, луч  $SPQ$ .

Обозначим расстояние  $SO$  от линзы до источника света через  $a$ , расстояние  $OD$  от линзы до точки фокусировки лучей через  $b$ , фокусное расстояние  $OF$  через  $f$ . Выведем формулу, связывающую эти величины.

Рассмотрим две пары подобных треугольников: 1)  $SOA$  и  $OFB$ ; 2)  $S'OA$  и  $S'FB$ . Запишем пропорции:

$$\frac{OA}{a} = \frac{BF}{f}, \quad \frac{OA}{b} = \frac{BF}{b-f},$$

Разделив первую пропорцию на вторую, получим:

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

После деления обеих частей выражения на  $b$  и перегруппировки членов, приходим к окончательной формуле:

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

где  $f$  — фокусное расстояние тонкой линзы.

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

### *Выполнение работы*

1. Определение фокусного расстояния собирающей линзы

**Способ 1.** Определение фокусного расстояния по расстоянию предмета и его изображения от линзы.

Чтобы построить изображение какой-либо точки предмета, необходимо построить ход двух лучей из этой точки через линзу по правилам геометрической оптики.

Луч, параллельный оптической оси, после преломления проходит через главный фокус. Если предмет находится на главной оптической оси, то для построения необходимо провести побочную оптическую ось.

Луч, проходящий через оптический центр линзы, не изменяет своего направления.

Луч, проходящий через передний фокус линзы, в силу обратимости хода лучей после преломления должен пройти параллельно главной оптической оси.

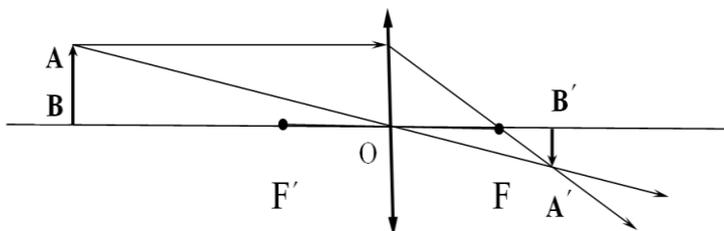


Рис. 10. Построение изображения в тонкой собирающей линзе

1. Поместив экран на достаточно большом расстоянии от предмета, ставят линзу и передвигают ее, добиваясь отчетливого изображения. Ввиду неточности визуальной оценки измерения проводят не менее пяти раз. Усредненные результаты измерений занесите в Таблицу 2.

2. Сделать чертеж хода лучей для каждого случая.

Таблица 2

Номер опыта	$a$ , м	$b$ , м	$f$ , м	$D$ , дптр	Характер изображения
1. $a = \infty$					
2. $a > 2F$					
3. $a = 2F$					
4. $F < a < 2F$					
5. $a = F$					
6. $a < F$					

**Способ 2 (Бесселя).** Определение фокусного расстояния по величине перемещения линзы

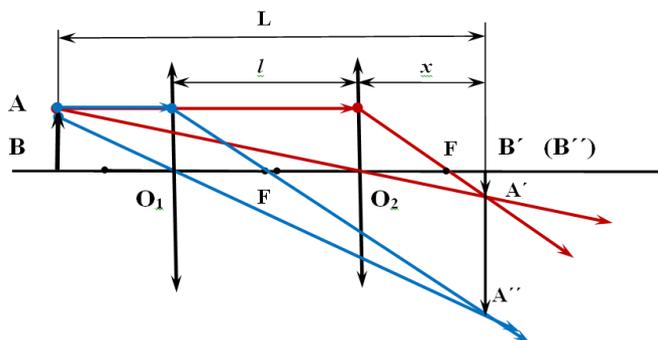


Рис. 11. Определение фокусного расстояния собирающей линзы методом Бесселя

Если расстояние от предмета до изображения  $L > 4f$ , где  $f$  – фокусное расстояние линзы, то всегда найдутся два таких ее положения, при которых на экране получается отчетливое изображение предмета в одном случае увеличенное, в другом – уменьшенное (рис. 11). Воспользовавшись уравнением (2), можно записать для 1-го и 2-го положений линзы.

$$f = \frac{(l-x)(L-l-x)}{L} \quad \text{и} \quad f = \frac{(L-x) \cdot x}{L} \quad (3)$$

Приравняв правые части этих уравнений, найдем  $x = \frac{L-l}{2}$  (расстояние от изображения до второго положения линзы). Подставим значения  $x$  в выражении  $L - l - x$  (расстояние от предмета до первого положения линзы), найдем, что:

$$L - l - x = \frac{L-l}{2}$$

Следовательно, оба положения линзы находятся на равных расстояниях от предмета и изображения, т.е.  $BO_1 = B'O_2$ . Чтобы получить выражение для фокусного расстояния линзы, рассмотрим одно из ее положений, например (1).

Для этого случая

$$\text{расстояние от предмета до линзы } a = \frac{L-l}{2},$$

$$\text{расстояние от линзы до изображения } b = \frac{L+l}{2}.$$

Подставив эти величины в формулу (2), найдем:

$$f = \frac{L^2 - l^2}{4L} \quad (4)$$

### *Измерения*

Установите предмет и экран на расстоянии  $L > 4f$  (ориентировочно значение  $f$  берут из результата определения фокусного расстояния линзы по первому способу), помещают линзу между ними и, передвигая ее, добиваются получения на экране отчетливого изображения предмета, например, увеличенного. Отсчитав по шкале (линейке) соответствующее положение линзы ( $O_1$ ), сдвигают линзу в сторону и вновь устанавливают.

Передвигая линзу (при том же расстоянии  $L$ ), добиваются получения второго отчетливого изображения предмета – уменьшенного и вновь отсчитывают положение линзы по шкале ( $O_2$ ).

Измеряют расстояние между предметом и экраном, а также среднее значение перемещения  $l$ , вычисляют фокусное расстояние линзы по формуле (4). Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу 3. Эти измерения повторяют не менее 5 раз.

Таблица 3

№	L	Положение линзы $O_1$	Положение линзы $O_2$	F	$F_{cp}$	Расстояние между линзами $O_1O_2 = l$

## 2. Определение увеличения собирающей линзы

Получите на экране четкое изображение предмета. Измерьте штангенциркулем высоту предмета в вертикальном направлении  $h_0$ . Аналогично определите размеры изображения предмета  $h$ . Вычислите увеличение  $h/h_0$ . Повторите измерения при других значениях **a** и **b**. Данные занесите в таблицу 4.

Таблица 4

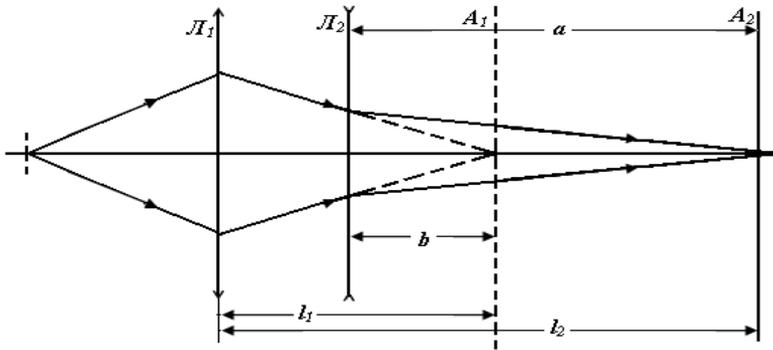
№	a	b	$h_0$	h	b/a	$h/h_0$
1						
2						
3						

Сделайте вывод о зависимости увеличения линзы от расстояния между предметом и линзой. При каком расположении предмета относительно линзы увеличение будет максимально возможным?

### 3. Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы с помощью собирающей линзы

С помощью собирающей линзы получите изображение предмета на экране  $A_1$ , находящемся на расстоянии  $l_1$  от линзы  $L_1$  (рис. 3).

Рис. 12. Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы



Если на оптическую скамью между экраном  $A_1$  и линзой  $L_1$  поставить рассеивающую линзу  $L_2$ , то изображение сетки на экране исчезнет, но его можно получить, поместив экран на расстоянии  $l_2$  от собирающей линзы (положение  $A_2$ ).

Используя уравнение (1), можно выразить фокусное расстояние рассеивающей линзы через отрезки  $a$  и  $b$ , учесть, что  $f$  и  $b$  имеют отрицательные значения (правило знаков), то согласно формуле (1) получим:

$$-\frac{1}{f} = \frac{1}{a} - \frac{1}{b}$$

И, следовательно:

$$f = \frac{ab}{a - b} \quad (5)$$

### *Примечание*

Перемещать можно либо экран, либо рассеивающую линзу, но ни в коем случае оба прибора одновременно в ходе одной серии совместно обрабатываемых измерений. Вычисляют по формуле (5) фокусное расстояние. Результат измерений и вычислений заносят в таблицу 5.

Таблица 5

Номер опыта	a	b	F	D

### *Контрольные вопросы к лабораторной работе 2*

1. Дайте определение фокусного расстояния и оптической силы линзы. Что такое фокус? Что такое фокальная плоскость?
2. Укажите правило знаков, принятых в геометрической оптике.
3. Запишите формулы для собирающей и рассеивающей линз. Чем отличается собирающая и рассеивающая линзы?
4. Постройте график зависимости  $b = f(a)$ , сопоставьте полученный результат с экспериментальными данными.
5. Выведите формулу Ньютона из рисунков построения изображений. Получите из формулы Ньютона формулу для центрированной оптической системы.
6. Расскажите о методах Аббе и Бесселя для определения фокусного расстояния линз.
7. Расскажите о способе определения фокусного расстояния рассеивающей линзы.
8. Постройте изображение предмета, находящегося на главной оптической оси.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ОПТИЧЕСКОЙ  
СИЛЫ ЛИНЗЫ С ЕЕ ФОРМОЙ**

**Оборудование:** источник электропитания, корпус осветителя (настольный), источник света, пластина с одинарной щелью, прозрачный полуцилиндр, лимб, линза двояковыпуклая, линза плосковыпуклая, экран, линейки на магнитных полосках, лист бумаги.

**Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы**

Рассмотрим луч  $AM$ , падающий под углом  $i$  на сферическую границу двух сред с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ , угол  $r$  – угол преломления.

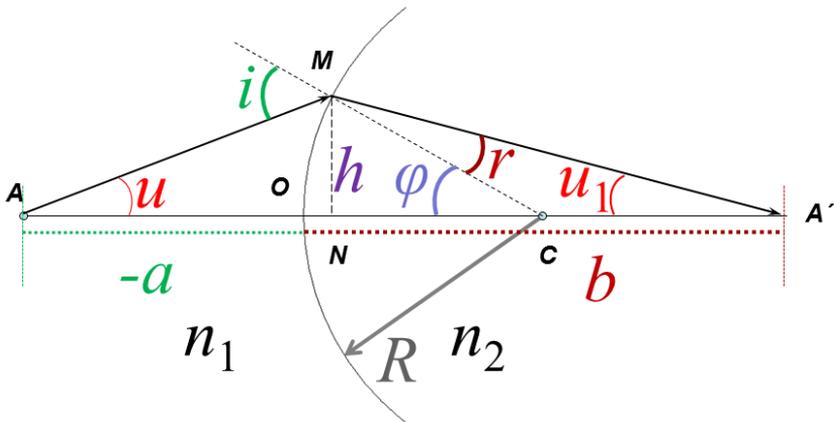


Рис. 13. Преломление на сферической поверхности

На основании теоремы о внешнем угле треугольника для  $\Delta A'CM$   $\varphi = r + u_1$  (1), для  $\Delta AMC$   $i = u + \varphi$  (2). Из (1) следует  $r = \varphi - u = h/R - h/b$ . Согласно закону преломления  $\sin i / \sin r = n_2/n_1$ , для малых углов  $i = n r$ ,

следовательно,  $\frac{h}{(-a)} - \frac{h}{R} = \frac{nh}{R} - \frac{nh}{b}$ , принимая, что  $n = n_2/n_1$ , получаем  $\frac{nh}{R} - \frac{nh}{b} = \frac{h}{-a} + \frac{h}{R} \Rightarrow \frac{n}{b} - \frac{1}{a} = \frac{n-1}{R} \Rightarrow \frac{n_2}{b} - \frac{n_1}{a} = \frac{n_2 - n_1}{R} = D$ , где D – оптическая сила сферической поверхности.

Оптическая линза, как центрированная система, состоит из двух преломляющих поверхностей, с оптическими силами  $D_1 = \frac{n_2 - n_1}{R_1}$  и

$$D_2 = \frac{n_1 - n_2}{R_2}.$$

Оптическая сила линзы равна  $D = D_1 + D_2 - \frac{d}{n_2} \cdot D_1 \cdot D_2$ , если d – толщина линзы много меньше радиусов кривизны  $R_1$  и  $R_2$ , то

$$D = D_1 + D_2 = (n_2 - n_1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3).$$

### *Выполнение работы*

1. Соберите установку для определения показателя преломления: вставьте в корпус осветителя (настольного) лампу и пластину с одинарной щелью и подключите лампу к источнику электропитания. Двигая лампу в корпусе осветителя, добейтесь, чтобы на поверхности лимба, лежащего на столе, появился узкий не расходящийся пучок света – луч. На лимбе в изображенный на нем контур поместите пластиковый полуцилиндр и направьте на его плоскую сторону свет.

2. Направляя луч света в центр плоской грани полуцилиндра, измерьте угол падения и угол преломления при нескольких значениях. Заполните таблицу 6. Рассчитайте показатель преломления для

каждого значения угла падения и среднее значение показателя преломления материала линзы.

Таблица 6

№	Угол падения $\alpha$ , °	Угол преломления $\beta$ , °	$\sin \alpha$	$\sin \beta$	$n = \sin \alpha / \sin \beta$
Среднее					

3. Определите радиус кривизны для плосковыпуклой линзы из того же материала. Для этого обведите профиль линзы, постройте две хорды, восстановите серединный перпендикуляр к каждой хорде, найдите точку их пересечения – это и есть центр кривизны выпуклой поверхности линзы. Измерьте радиус кривизны.

4. Проведя эксперимент дважды, оцените ошибку измерения  $\Delta R$  радиуса кривизны выпуклой поверхности профиля линзы.

5. Зная радиус кривизны двух поверхностей и показателя преломления материала линзы, оцените фокусные расстояния плосковыпуклой и двояковыпуклой линз.

6. Поменяйте пластинку с одинарной щелью на пластинку с тремя щелями. Перемещая лампочку, добейтесь, чтобы лучи, выходящие из щелей, были параллельны друг другу. Поставьте линзу, радиус кривизны которой вы определили, перпендикулярно лучам. Обведите профиль линзы и отметьте на бумаге положение фокуса такого профиля. Оцените фокусное расстояние и сравните с расчетным значением. Решите, что можно считать центром реальной линзы, от которого рассчитывается фокусное расстояние.

7. Повторите измерения для двояковыпуклой линзы.

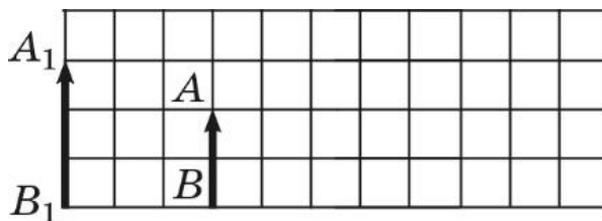
*Контрольные вопросы к лабораторной работе 3*

1. Перечислите области применения линз.

2. Найдите оптическую силу и фокусное расстояние линзы, помещенной в жидкость с показателем преломления 1,7, если в воздухе ее оптическая сила – 5 дптр. Показатель преломления линзы 1,5.

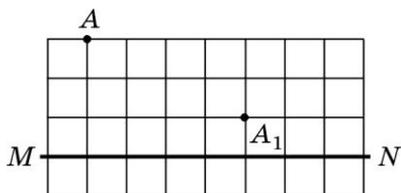
3. Найдите фокусное расстояние кварцевой линзы для ультрафиолетовой линии спектра ртути (259 нм), если фокусное расстояние для желтой линии спектра натрия (589 нм) равно 16 см. Показатели преломления для этих длин волн равны  $n_1 = 1,504$ ,  $n_2 = 1,458$ .

4. На рисунке 14 изображены предмет АВ и его изображение  $A_1B_1$ , полученное с помощью линзы. Расстояние между линиями сетки равно 5 см. Определите, это собирающая или рассеивающая линза, ее оптическую силу и расстояние от предмета до линзы.



*Рис. 14. Предмет АВ и его изображение  $A_1B_1$ , полученное с помощью линзы*

5. На рисунке 15 показаны главная оптическая ось линзы MN, светящаяся точка А и ее изображение  $A_1$ , полученное с помощью линзы. Расстояние между линиями сетки равно 10 см. Постройте ход проходящих через линзу лучей. Определите характер изображения, фокусное расстояние.



*Рис. 15. Предмет  $A$  и его изображение  $A_1$ , полученное с помощью линзы*

6. При какой толщине выпукло-вогнутая толстая стеклянная линза в воздухе будет иметь оптическую силу, равную  $-1,0$  дптр, если радиус ее выпуклой поверхности  $10,0$  см, а вогнутой  $- (7,5$  см).

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАРДИНАЛЬНЫХ ТОЧЕК И ПЛОСКОСТЕЙ ЛИНЗ И ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Оборудование:** скамья Глазырина, осветитель, набор собирающих линз, линейка.

### ***Подготовка допуска к выполнению работы***

Оптической системой называется совокупность преломляющих и отражающих поверхностей, преобразующих световые пучки. Оптическая система называется идеальной, если гомоцентрический пучок, падающий на систему, преобразуется ею также в гомоцентрический пучок, все лучи которого пересекаются в одной точке. В такой системе каждой точке предмета будет соответствовать одна определенная точка изображения. Такие точки называются **сопряженными**. В системе имеются также сопряженные плоскости и лучи. Для сопряженных лучей и точек выполняется свойство обратимости.

Практическое значение имеют центрированные оптические системы. В такой системе главная оптическая ось проходит через центры кривизны всех поверхностей.

### ***Кардинальные точки и плоскости***

Кардинальными точками называются такие точки и плоскости оптической системы, задание которых полностью описывает все свойства оптической системы, и позволяют пользоваться ими, не рассматривая реального хода лучей в системе.

К кардинальным точкам относятся *фокусы, главные и узловые точки*, кардинальными плоскостями являются *фокальные, главные и узловые*.

Если на произвольную идеальную оптическую систему направлен пучок лучей, параллельный главной оптической оси, то он является гомоцентрическим, точка его пересечения лежит на главной оптической оси в бесконечности. Вследствие того, что система является идеальной, такой пучок преобразуется в гомоцентрический, точка пересечения которого также лежит на главной оптической оси в пространстве изображения и называется задним **фокусом**. Аналогично, пользуясь свойством обратимости световых лучей, можно показать существование и единственность переднего фокуса, т.е. такой точки, лежащей на главной оптической оси, исходя из которой, падающий пучок преобразуется оптической системой в пучок, параллельный оптической оси.

Плоскости, проведенные через передний и задний фокусы, перпендикулярные главной оптической оси, называются соответственно **передней и задней фокальными плоскостями**.

В том случае, когда источник падающего пучка лежит на расстоянии  $Y$  от главной оптической оси, то сопряженная ей точка в пространстве изображения лежит на расстоянии  $Y'$  от главной оптической оси. Отношение называется линейным увеличением системы  $\beta = Y'/Y$ .

В идеальной оптической системе имеются определенные сопряженные плоскости, перпендикулярные главной оптической оси, точки которых взаимно отображаются с линейным увеличением, равным единице. Такие плоскости называются **главными плоскостями системы**, а точки их пересечения с главной оптической осью называются **главными точками системы**.

### **Определение положения главных плоскостей толстой линзы**

Для определения положения главных плоскостей направим на оптическую систему слева луч 1, параллельный главной оптической оси на расстоянии  $y$  от нее, который должен после преломления

пройти через фокус. Если направить луч справа параллельно главной оптической оси, то он пройдет через фокус  $F'$  с другой стороны. Точки пересечения падающего и преобразованного лучей лежат на главных плоскостях. Следует провести через эти точки плоскости перпендикулярно главной оптической оси, которые и являются главными плоскостями системы  $H$  и  $H'$ . Условно считается, что на главных плоскостях происходит преломление падающих лучей (рис.16).

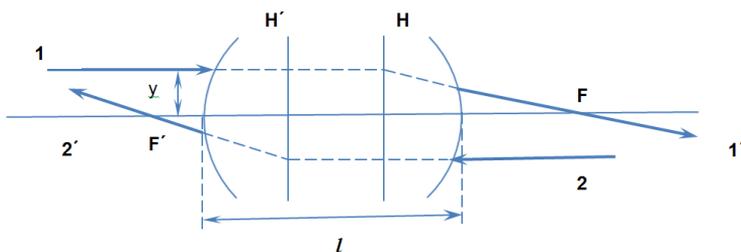


Рис. 16. Ход лучей в толстой линзе

Фокусное расстояние оптической системы равно расстоянию от главной плоскости до фокуса системы и обратно пропорционально оптической силе.

$$D_0 = \frac{n_2 - n_1}{R} - \text{оптическая сила преломляющей поверхности};$$

$D = D_1 + D_2 - \frac{l}{n} D_1 D_2$  – оптическая сила толстой линзы,  $D_1$  и  $D_2$  – оптическая сила преломляющих поверхностей,  $n$  – показатель преломления линзы.

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{b}{a}$$

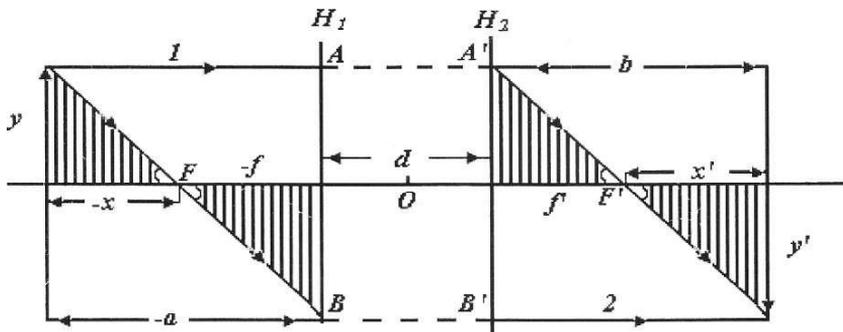


Рис. 17. Ход лучей в оптической системе

Задание положений фокальных и главных плоскостей достаточно для выполнения построений в оптической системе (рис.17). Из подобия треугольников можно получить уравнение Ньютона для данной системы  $x x' = f f'$ , где  $x$  расстояния сопряженных точек от соответствующих фокальных плоскостей, а  $f$  и  $f'$  переднее и заднее фокусные расстояния системы, которые отмеряют от главных плоскостей. Из рисунка следует что, не зависимо от того как луч света, вошедший в оптическую систему, распространяется внутри нее, мы можем выполнить построения изображений, отвлекаясь от реального преломления лучей на сферических поверхностях.

#### Угловое увеличение и узловые точки

Отображение в оптической системе точек, лежащих на главной оптической оси, характеризуется угловым увеличением, равным  $u = \frac{u'}{u}$  (рис. 18). Используя уравнение  $u p u' = u' p' u$ , можно получить соотношение между линейным и угловым увеличениями:  $y'/y = n u / n' u'$ . Сопряженные точки на главной оптической оси, отображаемые угловым увеличением  $u = 1$ , называются узловыми точками  $N$  и  $N'$ . Узловые точки обладают таким свойством, что, проходя через

них в действительности или при воображаемом продолжении внутрь системы, сопряженные лучи параллельны между собой.

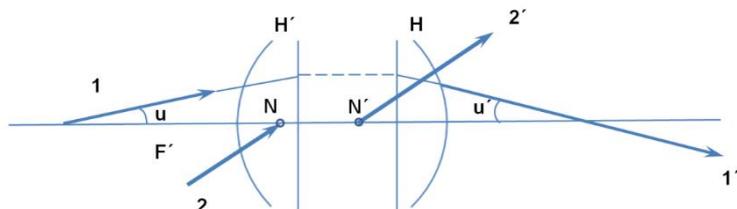


Рис. 18. Узловые точки оптической системы

Рассмотрим систему из двух линз, расположенных на конечном расстоянии  $d$  между внутренними главными плоскостями системы, называемым оптическим интервалом системы линз (рис. 19).

Значение оптической силы системы определяется уравнением сложения:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} - \frac{d}{n} \frac{1}{F_1 F_2} \quad \text{или} \quad D = D_1 + D_2 - \frac{d}{n} * D_1 D_2,$$

где  $D_1$  и  $D_2$  оптические силы отдельных линз.

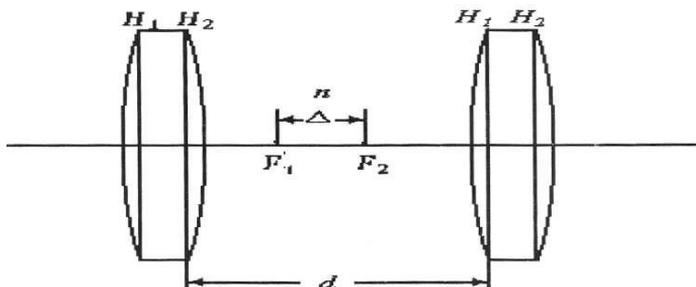


Рис. 19. Система линз

Для тонких линз  $d = H_2H_1$  представляет собой просто расстояние между линзами. При сложении линз вплотную значение  $d = 0$ . Для рассеивающей линзы значение  $D_2$  отрицательно, что учитывается при использовании формулы сложения линз. Положение фокусов и главных плоскостей системы определяется геометрическим построением и вычисляется по формуле сложения.

### *Выполнение работы*

#### **1. Определение кардинальных точек и плоскостей толстой линзы**

Проведите главную оптическую ось, расположите соответственно на ней толстую линзу и направьте слева луч параллельно главной оптической оси на расстоянии  $h$  от нее. Обозначьте ход падающего и преломленного луча. Обведите карандашом поверхность линзы и снимите ее. Проведите лучи, падающий и преломленный, до их пересечения. Точка пересечения определяет положение главной точки. Через главную точку проведите главную плоскость перпендикулярно главной оптической оси. Аналогично направьте луч на линзу с правой стороны и определите положение второй главной плоскости. Определите построением положение фокусов и фокальных плоскостей по обе стороны линзы. Сравните с теоретическим значением, рассчитав по формуле  $D = D_1 + D_2 - \frac{l}{n} D_1 D_2$ .

#### **2. Определение кардинальных точек и плоскостей системы линз**

а) Используйте систему из двух собирающих линз. Первоначально убедитесь построением, что линзы тонкие. Необходимо выполнить работу геометрически и проверить вычислением по формуле сложения.

б) Направляя на каждую из линз луч света параллельно главной оптической оси, определите их фокусные расстояния.

с) Расположите линзы на расстоянии  $d > (f_1 + f_2)$ , направьте на систему луч света параллельно главной оптической оси слева и справа, зарисуйте ход этих лучей после прохождения системы. Уберите линзы и сделайте необходимые построения по определению фокусов и главных плоскостей системы.

Проверьте результаты вычислением по формуле сложения.

д) Расположите линзы на расстоянии  $d < (f_1 + f_2)$ , выполните работу согласно пункту с).

е) Расположите линзы на расстоянии  $d = (f_1 + f_2)$ . Определите положение главных точек и плоскостей для этого случая.

#### *Контрольные вопросы к лабораторной работе 4*

1. Дайте определение толстой и тонкой линзам.
2. Дайте определение центрированной оптической системы.
3. Что такое кардинальные точки и плоскости?
4. Приведите формулы для увеличений систем.
5. Выведите формулу Ньютона для толстой линзы.
6. Покажете ход лучей в системе тонких линз, покажите на рисунке отрезок, определяющий фокусное расстояние.
7. Что такое гелиограф? Объясните принцип действия и ход лучей в приборе.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. ИЗУЧЕНИЕ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ

**Оборудование:** зрительная труба, диафрагма с ромбическим вырезом, лупа с микроскопической шкалой, вертикальный масштаб, рулетка, таблица кругов Ландольта.

### Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы

#### Телескопическая система линз

Микроскоп и зрительная труба – приборы, вооружающие глаз. Глаз, в свою очередь, очень чувствительный и тонкий оптический прибор. Одной из замечательных особенностей глаза является его способность к аккомодации. При рассмотрении предметов, расположенных на различных расстояниях, кривизна хрусталика (его оптическая сила) автоматически изменяется, так что изображение предмета в случае нормального глаза получается всегда на сетчатке. Чем ближе расположен предмет, тем больше угол зрения, под которым мы его видим и тем больше размеры изображения на сетчатке. При этом на рассматриваемом объекте можно различить больше деталей. При рассмотрении объектов, расположенных на больших, но конечных расстояниях, с помощью зрительной трубы увеличивается угол зрения.

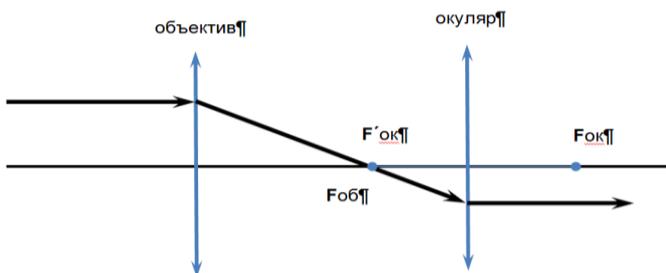


Рис. 20. Телескопическая система

Зрительные трубы состоят из объектива и окуляра. На рисунке 20 они расположены так, что образуют телескопическую систему. Оптическая сила системы двух тонких линз, расположенных на расстоянии  $d$  друг от друга, выражается следующим образом:

$$D = D_1 + D_2 - dD_1D_2,$$

где  $d$  – расстояние между центрами линз. Для телескопической системы  $d = f_{об} + f_{ок}$ , откуда  $D = 0$ . Это значит, что луч, вошедший в систему параллельно главной оптической оси, выйдет из нее также параллельно главной оптической оси (рис. 20).

### Увеличение зрительной трубы

Угловое увеличение телескопической системы можно найти из рисунка 21. Предмет АВ, находящийся на расстоянии  $a$  от объектива, рассматривается под углом  $\alpha$ . При условии  $a \gg f_{об}$  (это имеет место для зрительных труб) в объективе получается действительное перевернутое изображение  $A_1B_1$  на расстоянии от объектива, почти равном  $f_{об}$ . Полученное изображение рассматривают через окуляр. Окуляр действует как лупа, расстояние до предмета  $A_1B_1$  от окуляра должно быть приблизительно равно  $f_{ок}$ .

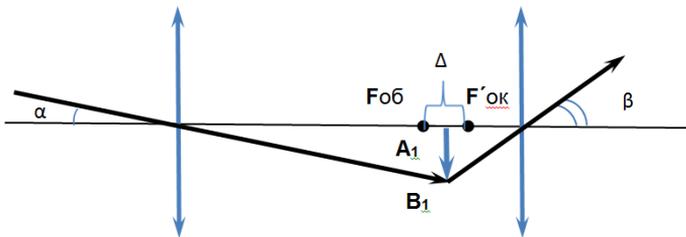


Рис. 21. Ход лучей в оптической системе

При наведении зрительной трубы на предметы, находящиеся на различном расстоянии от трубы, окуляр приходится перемещать.

Для всех реальных случаев – оптический интервал систем остается малым, и угловое увеличение зрительной трубы можно рассматривать как угловое увеличение телескопической системы.

Угловым увеличением зрительной трубы является отношение угла выхода луча из окуляра  $\beta$  к углу входа луча в объектив  $\alpha$ .

В силу малости углов можно считать:

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{tg\beta}{tg\alpha} \quad tg\alpha = \frac{A_1B_1}{F_{об}} \quad tg\beta = \frac{A_1B_1}{F_{ок}},$$

следовательно, угловое увеличение зрительной трубы равно:

$$W = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{F_{об}}{F_{ок}}.$$

От увеличения трубы зависит соотношение между площадью входящего и выходящего потоков – соотношение между входным и выходным зрачком (рис. 22). Так как зрительные трубы предназначены для вооружения глаза, то их выходной зрачок не должен превышать размеров зрачка глаза. Поэтому труба с определенным диаметром объектива не может иметь произвольного увеличения.

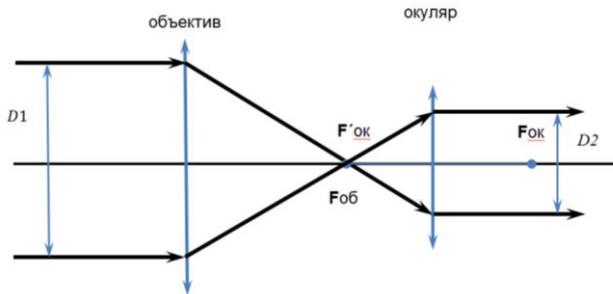


Рис. 22. Увеличение зрительной трубы

Это увеличение определяется отношением:

$$W = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{D_1}{D_2},$$

где  $D_1$  – диаметр объектива,  $D_2$  – диаметр зрачка глаза. Например, для трубы с диаметром объектива 50 см возможные значения увеличения лежат в пределах от  $20^{\times}$  до  $50^{\times}$  (это определяется размерами зрачка от 2,5 до 1 мм). Особенно большое значение имеют размеры диаметра объектива для телескопов и зрительных труб, предназначенных для наблюдения астрономических объектов.

Невооруженным глазом при хороших условиях наблюдения удастся видеть звезды до 6-й звездной величины. Расчеты показывают, что при этом в глаз человека за 1 секунду попадает примерно 60 квантов света. Крупнейший в России телескоп имеет диаметр объектива 6 м. С помощью такого телескопа можно обнаружить астрономические объекты, посылающие света в  $(6 \times 10^3 \text{ мм})^2 / (6 \text{ мм})^2 = 10^6$  раз меньше, чем звезды, видимые невооруженным глазом.

### ***Разрешающая способность объектива зрительной трубы***

Разрешающей способностью телескопа называют величину  $R = \frac{1}{\psi}$ , где  $\psi$  – минимальное расстояние между объектами, при котором они воспринимаются раздельно. Глаз как оптический прибор тоже характеризуется разрешающей способностью.

Опытным путем установлено, что для нормального глаза  $\psi = 1\text{--}2$  угловые минуты. Ограниченная разрешающая способность оптических приборов обусловлена дифракцией световых волн на отверстиях объектива. Английский физик Дж. Рэлей в конце XIX в. предложил условно считать разрешение полным, когда расстояния  $s$  между центрами изображений равно (или превышает) радиус  $r$  диска Эйри.

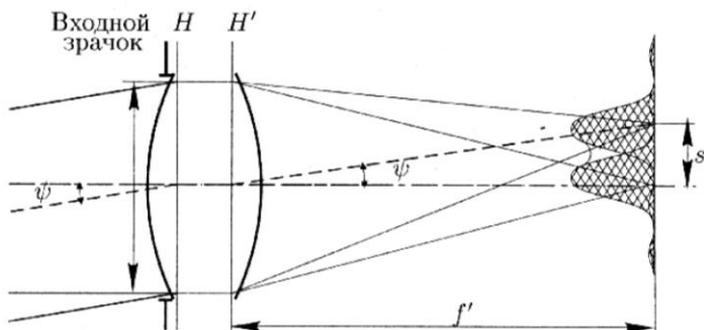


Рис. 23. Разрешающая способность оптической системы

В фокальной плоскости получается дифракционная картина. Угловая ширина центрального максимума  $\psi = \frac{1,22\lambda}{D}$ ,

где  $\lambda$  – длина световой волны, а  $D$  – диаметр объектива.

Условие разрешения дифракционных картин определяется критерием Релея: две дифракционные картины разрешены (воспринимаются отдельно), если центральный максимум одной картины приходится на первый минимум другой.

### Выполнение работы

#### 1. Определение поля зрения трубы

Угловые размеры тела, видимого в трубу, определяют поле зрения трубы. Очевидно, что поле зрения определяется размерами выходного зрачка ( $d$ ) и длиной трубы  $L$ . Поле зрения трубы можно определить экспериментально, измерив угол  $\alpha$  (рис. 24).

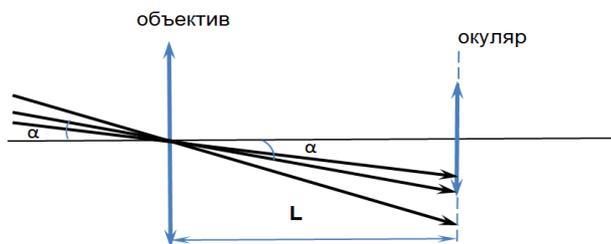


Рис. 24. Поле зрения зрительной трубы

Для этого перед объективом трубы расположите вертикальную шкалу с делениями. Сосчитайте общее число делений, видимых в трубу. Зная цену деления и расстояние от шкалы до объектива трубы, можно определить поле зрения:

$$\alpha = \frac{N \cdot i}{a}.$$

Выполните измерения не менее трёх раз, изменяя расстояние от шкалы до объектива как можно больше. Заполните таблицу 7.

Таблица 7

№	Расстояние $a$ , м	Число делений $N$	Поле зрения $\alpha$	$\alpha$ теор. = $d/L$
среднее				

## 2. Определение увеличения зрительной трубы

Наиболее удобным и простым способом определения увеличения зрительной трубы, у которой объективом и окуляром служат собирающие линзы, является способ Рамсдена, основанный на соотношении размеров входного и выходного зрачков с фокусными расстояниями объектива и окуляра для телескопической системы (рис. 25).

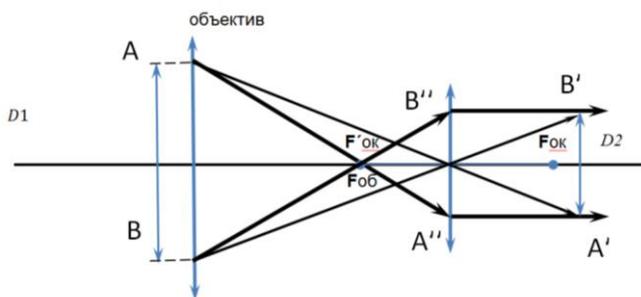


Рис. 25. Увеличение зрительной трубы

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{f_{об}}{f_{ок}}$$

Для большего удобства определения размеров входного зрачка надевают диафрагму с ромбическим вырезом (рис. 25). Изображение точек  $A$  и  $B$  диафрагмы в собирающей линзе окуляра получается уменьшенное, перевернутое действительное, размеры которого равны размерам выходного зрачка (окуляра). Измерив с помощью лупы с микрошкалой размеры изображения, получаем размеры выходного зрачка.

#### Порядок измерений

Устанавливают трубу на бесконечность (окуляр находится на небольшом расстоянии от объектива). Измеряют длину диагоналей ромба  $l_1$  и  $l_2$ . Устанавливают лупу вблизи окуляра и, слегка перемещая лупу, добиваются получения отчетливого изображения ромба. Поворачивают ромбическую диафрагму так, чтобы направления диагоналей последовательно совпали с направлением шкалы. Измеряют длины  $l'_1$  и  $l'_2$  в делениях шкалы, затем выражают в тех же единицах. Вычисляют увеличение зрительной трубы по формуле:

$$W = \frac{l_1/l'_{1}}{2} + \frac{l_2/l'_{2}}{2}.$$

Находят среднее значение увеличения и погрешность измерения. Результаты измерений и расчетов заносят в таблицу 8. Сравните среднее значение увеличения с теоретическим значением.

Таблица 8

№	$l_1$	$l_2$	$l'_{1}$	$l'_{2}$	W
среднее					

3. Определение разрешающей способности глаза и зрительной трубы

Рассмотрите (одним глазом) специальную таблицу кругов Ландольта с расстояния пяти метров. Нужно найти на ней объект с изображением колец, в которых еще видны разрезы.

Зная расстояние между краями разреза, а также расстояние от глаза до таблицы, определите экспериментальное значение предельного угла разрешения  $\phi_{\min}$  и разрешающей способности глаза R.

Наблюдая изображение глаза в плоском зеркале, измерьте диаметр изображения зрачка (штангенциркулем). Рассчитайте значение предельного угла разрешения  $\phi_{\min}$  и разрешающую способность глаза R при  $\lambda = 550$  нм. Рассчитайте также значения  $\phi_{\min}$  и R для зрительной трубы, с которой вы работали, выполняя задания 1 и 2.

*Контрольные вопросы к лабораторной работе 5*

1. Телескопическая система. Оптическая сила телескопической системы.

2. Показать ход лучей в зрительной трубе.
3. Вывести формулу углового увеличения зрительной трубы.
4. Что такое угол зрения трубы? Поле зрения?
5. Как практически и теоретически определить поле зрения трубы?
6. Как практически определить увеличение трубы (способ Рамсдена)?
7. Для чего к трубе присоединена микроскопическая приставка?
8. Чем отличаются зрительные трубы Галилея и Кеплера?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСКОПА

**Оборудование:** микроскоп со сменными окулярами, микрошкала, миллиметровый масштаб вертикальной шкалы, дифракционная решетка, стеклянная пластина.

### ***Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы***

**Устройство микроскопа.** Микроскоп применяется для рассмотрения и измерения размеров малых объектов. Микроскоп состоит из раздвижного тубуса, в нижней части которого расположен объектив, а в верхней – окуляр.

Объектив – короткофокусная система линз, дающая действительное увеличенное изображение предмета. Увеличение дает передняя (фронтальная линза), остальные служат для исправления ее недостатков.

Окуляр дает дополнительное увеличение изображения. Окуляр состоит из двух собирающих линз: верхняя – глазная, нижняя – собирательная. Они вмонтированы в цилиндрическую трубку, и расстояние между ними равно полусумме их фокусных расстояний.

Тубус микроскопа помещен над столиком, на котором помещают рассматриваемый предмет. Под столиком расположена освещающая система, состоящая из зеркала и конденсора.

Тубус микроскопа с помощью винта ставят в такое положение, при котором предмет оказывается расположенным немного дальше главного фокуса объектива. Действительное изображение предмета, создаваемое объективом, рассматривается в окуляр как в лупу.

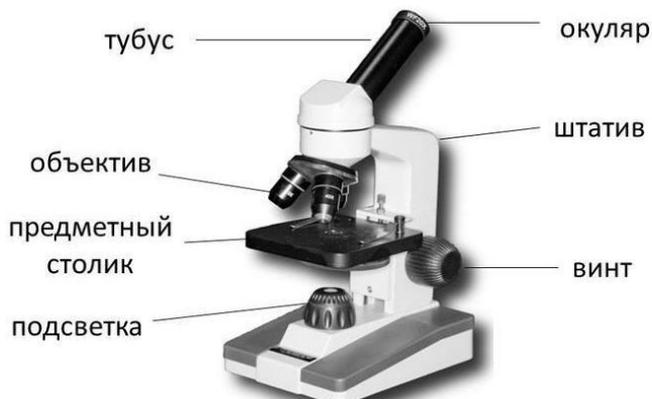


Рис. 26. Микроскоп

### Увеличение микроскопа

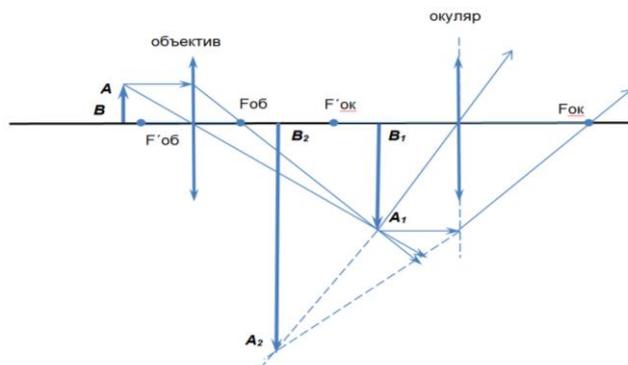


Рис. 27. Ход лучей в микроскопе

Ход лучей в микроскопе дан на рис. 27. Глаз, помещенный за окуляром, увидит в микроскопе мнимое обратное по отношению к предмету и сильно увеличенное изображение предмета. Положение этого изображения зависит от установки микроскопа. Наблюдатель устанавливает микроскоп таким образом, чтобы изображение было от глаза на расстоянии наилучшего зрения – примерно 25 см.

Увеличение микроскопа:

$$W = \frac{A_2B_2}{AB},$$

где  $AB$  – высота предмета,  $A_2B_2$  – высота изображения.

Будем считать для упрощения расчетов, что объектив и окуляр содержат по одной линзе с фокусным расстоянием  $f_{об}$  и  $f_{ок}$ . Кроме того, можно считать, что действительное изображение  $A_1B_1$  расположено вблизи главного фокуса окулярной линзы, т.е. на расстоянии, примерно равном  $f_{ок}$  от ее оптического центра, а предмет находится вблизи главного фокуса объектива –  $f_{об}$ .

Найдем увеличение объектива и окуляра этих условиях:

$$W_{об} = \frac{A_1B_1}{AB} = \frac{\delta}{f_{об}},$$

где  $\delta$  – расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра (оптическая длина тубуса микроскопа). Изображение, полученное от объектива, рассматриваем через окуляр как через лупу, и получаем увеличение:

$$W_{ок} = \frac{A_2B_2}{A_1B_1} = \frac{\Delta}{f_{ок}},$$

где  $\Delta$  – расстояние наилучшего зрения.

$$W_m = W_{об} \cdot W_{ок} = \frac{\delta \cdot \Delta}{f_{об} \cdot f_{ок}}.$$

Из последней формулы видно, что при данном объективе и окуляре увеличение  $W_m$  зависит от оптической длины тубуса, которую можно в некоторых пределах менять.

### *Выполнение работы*

1. Определение цены деления окулярной шкалы

Установите окуляр со шкалой; на предметный столик положите микрошкалу, совместите изображение делений двух шкал.

В этом случае справедливо соотношение:

$$Z_{ок} \cdot n_1 = Z_0 \cdot n_2,$$

где  $n_1$  – число делений окулярной шкалы;

$Z_{ок}$  – цена делений окулярной шкалы;

$n_2$  – число делений микрошкалы;

$Z_o$  – цена делений микрошкалы.

Тогда: 
$$Z_{ок} = \frac{Z_o \cdot n_2}{n_1}.$$

## 2. Измерение размеров мелких предметов

Измерьте толщину нити, волоса или любого другого мелкого предмета. Предмет укрепите на специальном стекле.

Поместите стекло на предметный столик и получите изображение предмета. Вращая окуляр, поставьте деления окулярного микрометра параллельно длине предмета.

Пусть отсчет по левому краю будет  $a$ , а по правому –  $b$ . Очевидно, что  $(b-a)$  есть кажущаяся ширина предмета в делениях шкалы.

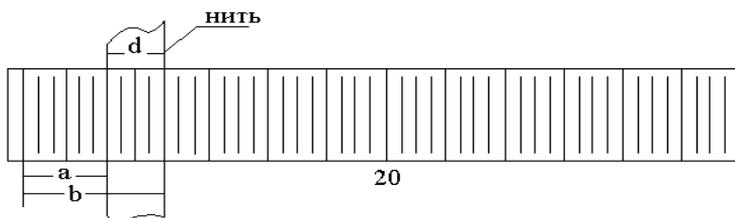


Рис. 28. Определение толщины нити

Промеры толщины предмета нужно сделать в разных местах и найти среднее значение его толщины.

## 3. Определение постоянной дифракционной решетки

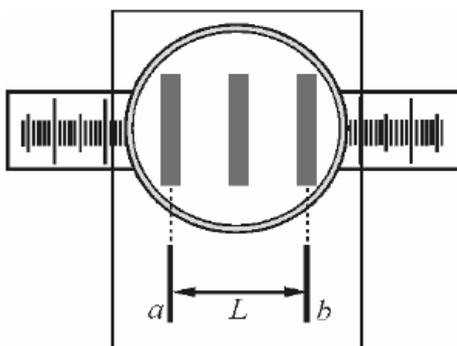
На столик микроскопа поместите дифракционную решетку и сфокусируйте прибор. Измерьте несколько раз ширину 5–10 штрихов решетки в делениях окулярной шкалы. Вычислите период дифракци-

онной решетки, т.е. расстояние между соседними штрихами  $d$  (мм) и постоянную дифракционной решетки  $N$  (число штрихов на 1 мм).

#### 4. Определение увеличения микроскопа

На столик микроскопа поместите микроскопическую шкалу с ценой деления 0,1 мм и получите ее изображение. Сбоку от микроскопа на расстоянии примерно 25 см поместите вертикальную шкалу с ценой деления 1 мм. С помощью специальной насадки, которая надевается на окуляр (тонкая стеклянная пластинка, укрепленная под углом  $45^\circ$  к оси микроскопа), добейтесь, чтобы изображение вертикального масштаба накладывалось на изображение микроскопической шкалы. Определите, скольким делениям вертикальной шкалы соответствует 2-3 деления микрошкалы. Увеличение микроскопа вычислите по формуле:

$$W_M = \frac{N \cdot a}{n \cdot b},$$



$N$  – число делений масштаба,  
 $n$  – число делений микрошкалы,  
 $a$  – цена деления масштаба,  
 $b$  – цена деления микрошкалы.

Рис. 29. Определение увеличения микроскопа

Увеличение микроскопа следует определить при одной и той же длине тубуса для следующих комбинаций объектива и окуляра.

- 1) объектив –  $8\times$ , окуляр –  $7\times$ ,
- 2) объектив –  $8\times$ , окуляр –  $10\times$ .

*Контрольные вопросы к лабораторной работе 6*

1. Сформулируйте определение: оптическая система, кардинальные точки и плоскости оптической системы.
2. Постройте ход лучей света в микроскопе.
3. Чем различаются микроскоп и телескоп?
4. Дайте определение увеличению микроскопа. От чего зависит эта величина? Приведите пример увеличений различных микроскопов.
5. Каким физическим явлением ограничено увеличение оптического микроскопа?
6. Какой минимальный размер предметов можно увидеть в оптический микроскоп, который используется в лабораторной работе?
7. С какой целью используют диафрагмы в оптических приборах?
8. Каким образом можно сфотографировать изображение, показанное микроскопом?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ И ЖИДКИХ ТЕЛ

**Оборудование:** микроскоп, набор стеклянных пластинок, микрометр, рефрактометр, растворы сахара различной концентрации.

### **Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы**

В основе всей геометрической оптики лежат законы отражения и преломления света на границе раздела двух сред.

Если луч света падает на такую границу, то он, преломившись, частично пройдет во вторую среду и частично отразится.

При этом угол отражения равен углу падения, а направление преломленного луча зависит от оптических плотностей сред. Закон преломления света можно сформулировать следующим образом:

1. Луч, падающий на преломляющую поверхность, нормаль к поверхности в точке падения и преломленный луч лежат в одной плоскости.

2. Отношение синуса угла падения  $i$  к синусу угла преломления  $r$

есть величина постоянная для двух данных сред:  $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = n$ , где

$n$  – относительный показатель преломления этих сред. Он зависит от свойств среды, из которой идет луч, и среды, в которую он проходит, и не зависит от угла падения.

Если свет падает на какую-нибудь среду из вакуума, то  $n_0$  называется абсолютным показателем преломления данной среды.

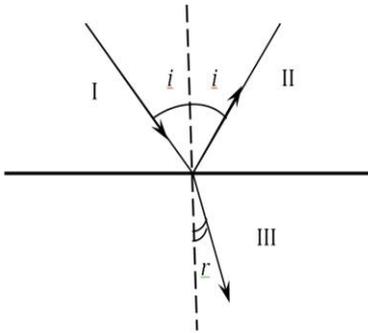


Рис. 30. Преломление света на границе оптических сред

Явление преломления света при переходе из одной среды в другую обусловлено изменением скорости распространения света. Относительный показатель преломления показывает, как изменяется скорость света при переходе из одной среды в другую.

$$n = \frac{v_1}{v_2}, \text{ т.е. } \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n.$$

Абсолютный показатель преломления  $n_0$  показывает, во сколько раз уменьшится скорость распространения света в данной среде по сравнению с вакуумом:

$$n_0 = \frac{c}{v_0} \text{ или } n_1 = \frac{c}{v_1} \quad n_2 = \frac{c}{v_2}.$$

Отсюда:

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Впервые закон преломления был выведен Гюйгенсом, исходя из волновых представлений о характере распространения света.

*Задание.* Воспроизведите построение Гюйгенса и получите соотношение:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Если  $n > 1$  (свет идет из менее плотной среды в более плотную, т.е.  $n_2 > n_1$ ), то  $i > r$ , т.е. преломленный луч приближается к нормали (рис. 31 а).

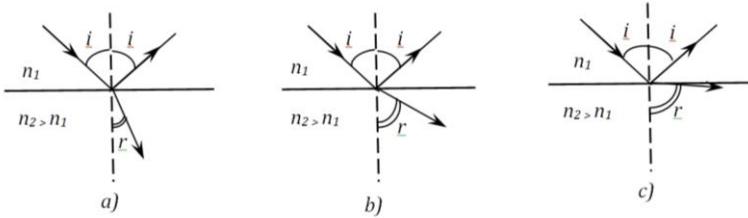


Рис. 31. Ход лучей на границе раздела двух сред

Если свет идет из более плотной среды в менее плотную ( $n_1 > n_2$ ), то угол  $r > i$  и преломленный луч удаляется от нормали (рис. 31 б).

Увеличивая угол  $i$ , можно получить угол  $r = \frac{\pi}{2}$ , при этом условно считается, что преломленный луч будет скользить вдоль границы раздела сред (рис. 31 с).

При дальнейшем увеличении угла падения  $i$  свет совсем не будет проходить во вторую среду, наступит полное внутреннее отражение.

Угол падения, при котором наступает явление полного внутреннего отражения, называется предельным углом полного внутреннего отражения  $i_0$ . В случае перехода света из среды с показателем преломления  $n$  в воздух справедливо соотношение:

$$\sin i_0 = \frac{1}{n}.$$

### Выполнение работы

#### 1. Определение показателя преломления стекла при помощи микроскопа

Предмет, рассматриваемый через плоскопараллельный слой прозрачного вещества, имеющего большую оптическую плотность по сравнению с воздухом, кажется нам расположенным ближе. Причиной этого является преломление лучей света при переходе из одной среды в другую. Представим себе, что мы рассматриваем точку  $O$  через плоскопараллельную пластинку толщиной  $d$  (рис. 32).

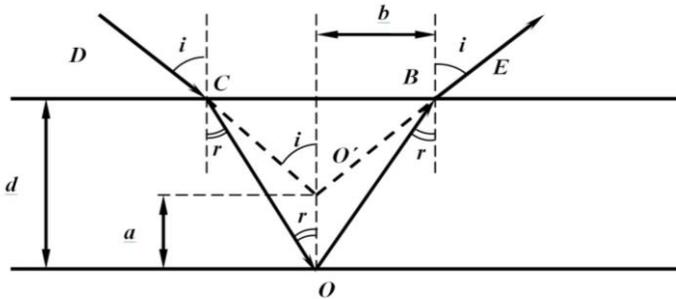


Рис. 32. Ход лучей в плоскопараллельной пластинке

Пусть точка  $O$  освещается лучом  $CO$ , луч  $OB$  отражается от т.  $O$ . После преломления этот луч пройдет по направлению  $BE$ . Наблюдая сверху, мы увидим точку  $O$  на пересечении продолжения лучей  $DC$  и  $BE$ , т.е. в точке  $O'$ . Таким образом, точка  $O$  покажется нам расположенной ближе на величину  $a = OO'$ . Найдем связь между показателем преломления стекла  $n$ , толщиной пластинки  $d$  и величиной кажущегося поднятия точки  $a$ .

Из рис. 32 следует, что:

$$\frac{d}{b} = \operatorname{ctg} r \frac{d}{d-a} = \operatorname{tg} i.$$

Перемножив полученные выражения, имеем:

$$\frac{d}{d-a} = \operatorname{ctg} r \cdot \operatorname{tg} i = \frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{tg} r}.$$

При малых углах  $i$  и  $r$  тангенсы углов можно заменить их синусами, тогда:

$$\frac{d}{d-a} = \frac{\sin i}{\sin r}.$$

Из закона преломления:  $\frac{\sin i}{\sin r} = n$ , поэтому  $\frac{d}{d-a} = n$ .

Описанным выше явлением кажущегося поднятия предмета пользуются для определения показателя преломления стеклянной пластинки при помощи микроскопа.

#### *Измерения*

На верхней и нижней поверхностях стеклянной пластинки нанесены два штриха под прямым углом. Сфокусируйте микроскоп так, чтобы видеть отчетливое изображение штриха на определенной (например, нижней) поверхности пластинки. Посредством микроскопического винта перемещайте тубус и найдите отчетливое изображение штриха на второй поверхности. Отсчитайте поступательное перемещение тубуса по шкале микрометрического винта. Это перемещение равно оптической толщине стеклянной пластинки.

Действительную толщину пластинки  $d$  можно определить с помощью микрометра. Зная действительную и оптическую толщину пластинки, можно определить показатель преломления стекла. В работе определите показатель преломления трёх стекол.

## 2. Исследование зависимости показателя преломления раствора от концентрации

### Описание прибора

Действие рефрактометра основано на использовании явления полного внутреннего отражения.

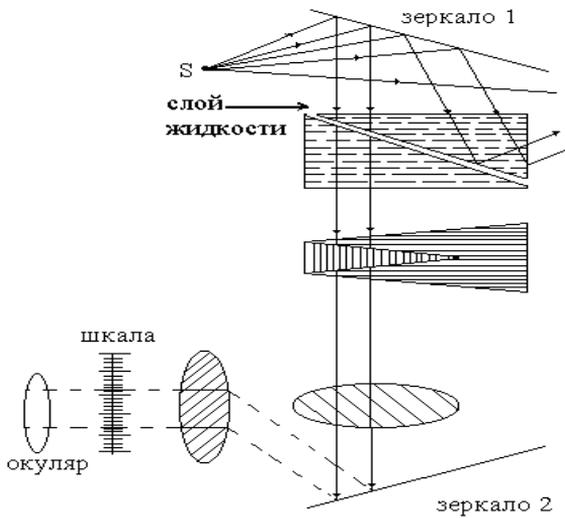


Рис. 33. Оптическая схема прибора

Оптическая схема прибора дана на рис. 33. Основной частью прибора служат две прямоугольные стеклянные призмы А и В с показателем преломления  $n = 1,75$ , сложенные в прямоугольный параллелепипед. Между ними помещается капля исследуемой жидкости с показателем преломления  $n_{ж} < 1,75$ .

Т.к.  $n_c > n_{ж}$ , то через жидкость во вторую призму пройдут только те лучи, для которых угол падения на границе стекло – жидкость меньше предельного угла полного внутреннего отражения. Лучи, для которых угол падения больше предельного, испытывают полное внутреннее отражение и во вторую призму не пройдут. В результате часть поля зрения трубы будет освещена, а другая останется темной. Величина темного и светлого полей зависит от показателя преломления жидкости. Положение границы раздела темного и светлого полей отмечается по шкале, на которой нанесены показатели преломления.

При наблюдении в белом свете граница света и тени вследствие дисперсии в призме и в жидкости окрашена. Для уничтожения окраски применяется компенсатор, представляющий собой сложную систему из трех призм (кронглас и флинтглас). Поворачивая эту призму вокруг своей оси, можно устранить дисперсию.

### *Измерения*

1. Отрегулировать источник света так, чтобы лучи света попадали в щель верхней части металлической оправки, где помещается призма А (нижняя щель должна быть при этом закрыта).

2. Осторожно раскрыть створку между верхней и нижней частями барабана. Протереть чистой тряпкой призмы А и В, при помощи пипетки взять несколько капель чистой воды и нанести на горизонтальную грань призмы В.

3. Закрыть призму В верхней призмой А. Обнаруженную в поле зрения окуляра границу света и тени совместить с центром крестообразной отметки. Если на границе раздела заметна окрашенная кайма, то следует ее устранить компенсатором.

4. Записать показания левой шкалы в том месте, где шкала пересекается границей света и тени. Прибор считается отрегулированным, если при комнатной температуре показатель преломления чистой воды окажется равным 1,333.

5. То же самое проделать с водными растворами сахара различной концентрации. Измерения для каждого раствора производятся не менее трех раз.

6. Построить график зависимости показателя преломления от концентрации водного раствора сахара и написать уравнение этой зависимости.

7. Пользуясь построенным графиком, определите концентрацию неизвестного раствора.

*Контрольные вопросы к лабораторной работе 7*

1. Сформулируйте определение показателя преломления. От чего зависит абсолютный показатель преломления вещества?

2. Что такое относительный показатель преломления?

3. На каком физическом явлении основано определение показателя преломления твердых тел с помощью микроскопа? Выведите формулу для определения показателя преломления.

4. На каком физическом явлении основано определение показателя преломления твердых тел с помощью рефрактометра?

5. Почему прибор называется рефрактометром?

6. Рассмотрите ход лучей в рефрактометре.

7. Приведите примеры использования полного внутреннего отражения в технике.

8. В чем заключается своеобразная огранка драгоценных камней и с чем это связано?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСОВ КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ И ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ МЕТОДОМ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

**Оборудование:** стеклянная плосковыпуклая линза, стеклянная пластинка, набор светофильтров, микроскоп с окулярной шкалой.

### *Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы*

**Расчет картины интерференции в тонких пленках.** Пусть на тонкую пленку толщины  $d$  и с показателем преломления  $n_2$ , находящуюся в среде с показателем преломления  $n_1$ , падает пучок света от некоторого источника (рис. 34). Оптическая разность хода лучей 1 и 2, интерферирующих в точке С:

$$\delta = 2n_2 \cdot AD - n_1 \cdot BC$$

В полученное выражение для разности хода  $\delta$  необходимо внести поправку на «потерю половины длины волны» при отражении.

Рассмотрим случай нормального падения лучей на поверхность диэлектрика.

Направление светового луча (направление скорости распространения света) связано с направлением векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  правилом правого винта (рис. 35 а). Чтобы изменилось направление вектора  $\vec{v}$ , произошло отражение света, направление вектора  $\vec{E}$  или  $\vec{H}$  должно измениться на противоположное (рис. 35 b и 35 c). В случае (35 b) направление вектора  $\vec{H}$  изменяется на противоположное, направление вектора  $\vec{E}$  не изменяется. Это имеет место при отражении от поверхности диэлектрика с меньшим значением  $\epsilon$ , а следовательно, и  $n$ , т.е. при отражении от поверхности оптически менее плотного диэлектрика.

Такое отражение называют отражением без потери полуволны. В случае (2с) изменяется на противоположное направление светового вектора  $\vec{E}$  – такое отражение называют отражением с потерей полуволны. Отражение света с потерей полуволны имеет место при отра-

жении от поверхности оптически более плотных сред. При расчете интерференции потеря полуволны при отражении равносильна увеличению оптического пути соответствующего луча на  $\frac{\lambda}{2}$ .

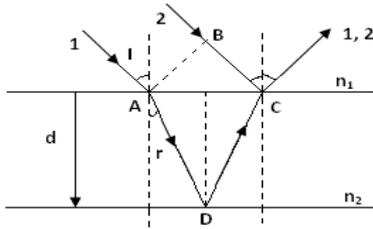


Рис. 34. Разность хода в отраженном свете

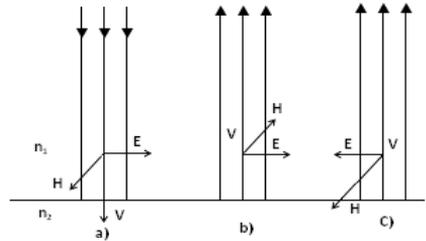


Рис. 35. Направление векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  при отражении света

**Задание.** На рисунке 35 покажите, от каких поверхностей отражение происходит с потерей полуволны и как это сказывается на оптической разности хода интерферирующих лучей.

Покажите на рисунке 35 разность хода лучей, отраженные от верхней и нижней поверхности пленки, и выразите эту разность хода через  $d$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $i$  с учетом возможной потери полуволны при отражении.

Выполните это задание для случая в проходящем свете.

**Возникновение колец Ньютона.** Если положить на плоскую стеклянную пластинку плосковыпуклую линзу, то между ними образуется воздушный зазор, с постепенно увеличивающейся толщиной  $d$  (рис. 5).

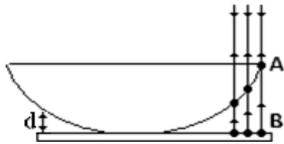


Рис. 36. Наблюдение колец Ньютона

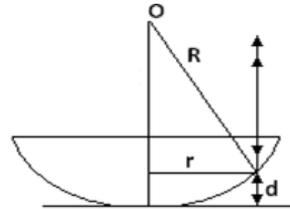


Рис. 37. Радиус кольца Ньютона

Вблизи точки соприкосновения угол между касательной к поверхности линзы и плоскостью очень мал, поэтому можно считать, что луч, нормальный к верхней (плоской) поверхности линзы, перпендикулярен и к нижней ее поверхности. Т.к. клин воздушный ( $n = 1$ ) и угол падения  $i = 0$ , то оптическая разность хода лучей, отраженных в точках A и B, будет равна:  $\delta = 2d$ , а с учетом потери полуволны при отражении в точке B получаем:

$$\delta = 2d + \frac{\lambda}{2}.$$

Получающаяся картина интерференции – кольца Ньютона – представляет собой полосы равной толщины.

В тех местах зазора, для которых выполняется условие:

$$2d + \frac{\lambda}{2} = k\lambda,$$

получаются светлые кольца.

В тех местах, для которых

$$2d + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

получаются темные кольца.

**Задание.** Используя рис. 37 и условие получения темных колец, рассчитайте радиус  $k$ -го темного кольца, считая, что радиус кривизны сферической поверхности равен  $R$ .

**Указание:** членами, содержащими  $d^2$ , можно пренебречь.

Для радиуса темного кольца с номером  $k$  получается выражение:  $r_k = \sqrt{kR\lambda}$ .

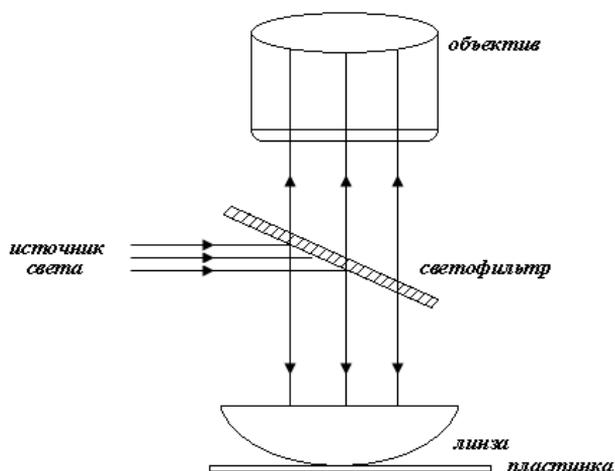


Рис. 38. Наблюдение колец Ньютона

#### Выполнение работы

1. Положите стеклянную пластинку с линзой на предметный столик микроскопа (рис. 38).
2. Сфокусируйте микроскоп на поверхность стеклянной пластины. Перемещая пластину с линзой, введите картину интерференции в поле зрения.
3. Перемещая тубус микроскопа и осветитель, добейтесь отчетливой картины колец Ньютона.
4. Для измерения радиусов темных колец используется окулярный микрометр. Шкала окулярного микрометра должна проходить по диаметрам колец (рис. 39). Для удобства определения радиусов темных колец записывайте положение серединок темных колец, начиная от 1, слева по шкале, а затем справа.

Разность отсчетов справа и слева дает диаметр соответствующего кольца в единицах шкалы окулярного микрометра.



Рис. 39. Определение диаметра кольца Ньютона

5. Повторите измерения радиусов темных колец, заменив красный светофильтр зеленым.

6. Определите цену деления окулярного микрометра, положив на предметный столик микроскопа микрошкалу с ценой деления 0,1 мм.

### 1. Определение радиуса кривизны сферической поверхности линзы

Из формулы  $r_k = \sqrt{kR\lambda}$ , зная  $k$ ,  $r_k$ , и  $\lambda$ , можно найти радиус кривизны  $R$ . Для красного светофильтра  $\lambda = 640$  нм. Вычисления получаются значительно точнее, если расчеты производить по следующей формуле:

$$R = \frac{(r_m - r_n)(r_m + r_n)}{(m - n)\lambda},$$

где  $m$  и  $n$  – номера двух достаточно удаленных друг от друга темных колец, а  $r_m$  и  $r_n$  – соответственно их радиусы.

Нужно вычислить  $R$  не менее трех раз (по трем парам темных колец) и найти  $R_{cp}$ ,  $\Delta R_{cp}$  и  $\frac{\Delta R_{cp}}{R_{cp}} \cdot 100\%$ .

## 2. Определение длины световой волны

Зная радиус кривизны сферической поверхности линзы  $R$ , можно вычислить длину волны монохроматического света, при освещении которым были получены кольца:

$$\lambda = \frac{(r_m - r_n)(r_m + r_n)}{(m - n)R}.$$

По измерениям колец в зеленом свете определите длину волны зеленого света, пропускаемого зеленым светофильтром.

Вычисления сделайте не менее трех раз по трем парам темных колец.

Найдите  $\lambda_{cp}$ ,  $\Delta\lambda_{cp}$  и  $\frac{\Delta\lambda_{cp}}{\lambda_{cp}} \cdot 100\%$ .

### *Контрольные вопросы к лабораторной работе 8*

1. Что такое интерференция?
2. Какие лучи называются когерентными?
3. Когда световые волны усиливают друг друга, а когда гасят?
4. В чем отличие полей в отраженном и проходящем свете?
5. В чем отличие полос равного наклона от полос равной толщины?
6. Опишите экспериментальную установку для использования колец Ньютона.
7. От чего зависит разность хода в опыте с кольцами Ньютона?
8. Почему радиусы колец различны для лучей разной длины волны.
9. Выведите формулу для определения радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона при известной длине волны монохроматического света. Предложите другой способ для определения кривизны линзы.
10. Как пронаблюдать интерференцию в природе? Почему мыльные пузыри и масляные пятна на поверхности воды окрашены?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

**Оборудование:** лазер, дифракционная решетка, линейка, штангенциркуль.

### **Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы**

**Изучение дифракционной решетки.** Дифракционная решетка представляет собой совокупность большого числа одинаковых, регулярно расположенных прямоугольных щелей. Обычно дифракционные решетки изготавливаются путем нанесения на стекло алмазом продольных царапин. Для того, чтобы царапины (непрозрачные промежутки) располагались на строго определенных расстояниях, их наносят с помощью специальных делительных машин.

Для объяснения возникновения дифракционной картины от решетки весьма существенно следующее обстоятельство:

– если бы каждая щель решетки являлась независимым источником света, то дифракционная картина на экране была бы точно такой же, как и от одной щели, только во много раз ярче;

– образование главных максимумов дифракционной решетки происходит вследствие интерференции когерентных световых волн, идущих от различных щелей;

– каждая щель ширины  $a$  посылает свет по различным направлениям, определяемым формулами:

$$a \sin \varphi = k\lambda - \text{минимум,}$$

$$a \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} - \text{максимум.}$$

При наблюдении дифракции по способу Фраунгофера определяется результат интерференции лучей, идущих от щелей параллельно друг другу, под некоторым углом к первоначальному направлению

света. Результат интерференции зависит от разности хода интерферирующих колебаний. Разность хода между колебаниями, идущими от соответствующих точек соседних щелей под углом  $\varphi$  (рис. 40), определяют так:  $\delta = d \sin \varphi$ . При условии, что эта разность хода равна  $k\lambda$ , все лучи, идущие от всех щелей по данному направлению, максимально усиливают друг друга – возникают главные максимумы дифракционной решетки.

Условие образования главных максимумов:

$$d \sin \varphi = k\lambda$$

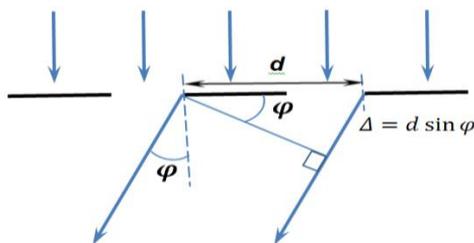


Рис. 40. Отклонение лучей при прохождении через дифракционную решетку

В направлении  $\varphi$ , удовлетворяющем условию главных максимумов, колебания от всех щелей складываются в одинаковых фазах или с разностью фаз, соответствующей  $2\pi k$  ( $k$  – целое число). Графически такой случай сложения колебаний можно представить так (рис. 2):



Рис. 41. Сложение амплитуд колебаний в одинаковой фазе

Увеличим немного угол дифракции. Это приведет к увеличению разности хода между соседними лучами на  $\Delta\delta$  и к изменению разности фаз между соседними колебаниями на  $\alpha = 2\pi \frac{\delta}{\lambda}$ .

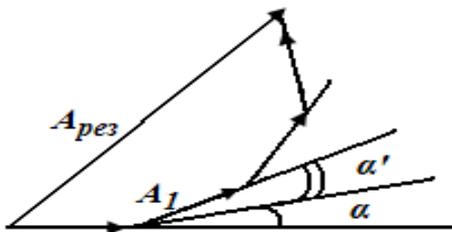


Рис. 42. Сложение колебаний с разностью фаз

Графическое сложение таких колебаний теперь дает следующее (рис. 42).

Дополнительная разность хода лучей, идущих от крайних щелей решетки, станет равной  $\delta N$ , а разность фаз между крайними лучами  $\alpha = 2\pi \frac{\delta N}{\lambda}$ , где  $N$  – общее число щелей дифракционной решетки.

Пусть  $\alpha = 2\pi$ , т.е.  $\alpha = \frac{2\pi}{N}$ .

При таком условии графическое сложение колебаний дает результат  $A_{рез} = 0$  (рис. 43).

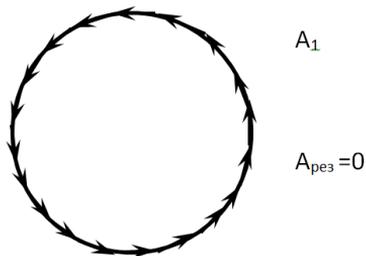


Рис. 43. Графическое сложение колебаний при разности фаз  $2\pi$

Такой же результат получится и при  $\alpha = n 2\pi$ .

Вывод: при интерференции  $N$  колебаний одинаковой интенсивности взаимное гашение всех колебаний (минимум) происходит при разности фаз между крайними колебаниями  $\alpha = \frac{n2\pi}{N}$ . Через разность

хода условие образования минимумов дифракционной решетки выразится так:

$$\delta = n\lambda \text{ или } \delta = \frac{n\lambda}{N}.$$

Найдем угол дифракции  $\varphi$ , при котором разность фаз  $\alpha$  между лучами, приходящими от крайних щелей, удовлетворяет условию минимума:  $d \sin\varphi = \delta$  (рис. 1). Из условия  $\delta = \frac{n\lambda}{N}$  получаем условие возникновения минимумов дифракционной решетки:  $d \sin\varphi = n\lambda \frac{1}{N}$ .

При  $n = 0; N; 2N; 3N, \dots, kN$  выражение  $d \sin\varphi = n\lambda \frac{1}{N}$  переходит в выражение  $d \sin\varphi = k\lambda$ , выражающее условие возникновения главных максимумов.

Полагая  $n = 1, 2, 3, 4, \dots, N-1$ , находят положение  $N-1$  минимумов между двумя соседними главными максимумами.

### **Разрешающая способность дифракционной решетки**

Пусть решетка освещается светом, содержащим две близкие длины волн,

$\lambda_1 = \lambda$ , и  $\lambda_2 = \lambda + \delta\lambda$ . Главный максимум  $k$  порядка для длины волны  $\lambda + \delta\lambda$  возникает под углом  $\varphi$ , удовлетворяющим условию:

$$d \sin\varphi_{max} = k(\lambda + \delta\lambda).$$

Минимум, ближайший к максимуму порядка  $k$  для длины волны  $\lambda_1 = \lambda$ , возникает, под углом  $\varphi$ , удовлетворяющим условию:

$$d \sin\varphi_{min} = k\lambda + \frac{\lambda}{N}.$$

На основании критерия Релея, середина максимума для длины волны  $\lambda_2$  должна совпасть с положением минимума для длины волны  $\lambda_1$ , то есть условием разрешения в спектре  $k$ -го порядка является равенство:

$$k\lambda_2 = k\lambda_1 + \frac{\lambda_1}{N} \quad \text{или} \quad k(\lambda + \delta\lambda) = k\lambda + \frac{\lambda}{N},$$

откуда  $\frac{\lambda}{\delta\lambda} = kN = R$  – разрешающая сила дифракционной решетки.

### Выполнение работы

#### 1. Определение длины волны лазера

Длину волны лазера можно определить из условия max дифракционной решетки  $d \sin\varphi = k\lambda$  т.к.  $\varphi$  – малый угол,  $\sin\varphi \approx \text{tg}\varphi = \frac{x}{D}$ , откуда

$$\lambda = \frac{d x}{k D},$$

где  $d$  – постоянная дифракционной решетки ( $d = \frac{1}{100}$  мм);

$x$  – расстояние от  $k$ -го max до главного, для увеличения точности необходимо воспользоваться формулой  $x_{\text{ср}} = \frac{x_{\text{лев}} + x_{\text{прав}}}{2}$ ;

$k$  – порядок спектра;

$D$  – расстояние от решетки до экрана.

Занесите данные эксперимента в таблицу 9.

Таблица 9

№	$x_{\text{лев}}, 10^{-2}$ м	$x_{\text{прав}}, 10^{-2}$ м	$x_{\text{ср}}, 10^{-2}$ м	$D, 10^{-2}$ м	$k$	$\lambda, 10^{-9}$ м
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

Рассчитайте доверительный интервал  $\Delta = \frac{k S_{\lambda}}{\sqrt{n}}$ ,

используя формулу для квадратичной эмпирической дисперсии

$$S_{\lambda}^2 = \sum \frac{(\lambda - \lambda_i)^2}{n-1}, \text{ где}$$

$S_{\lambda}$  – эмпирическая дисперсия;

$k$  – коэффициент Стьюдента, который для доверительной вероятности  $p = 0,95$  и числа опытов  $n=7$  принимает значение  $k = 2,447$  (см. Физический практикум 1 часть – Механика стр. 31).

## 2. Определение постоянной дифракционной решетки

Определите постоянную дифракционной решетки для различных  $D$  (таблица 10).

$$d = \frac{\lambda k D}{x} x_{\text{ср}} = \frac{x_{\text{лев}} + x_{\text{прав}}}{2}$$

Таблица 10

№	$x_{\text{лев}}, 10^{-2}$ м	$x_{\text{прав}}, 10^{-2}$ м	$x_{\text{ср}}, 10^{-2}$ м	$D, 10^{-2}$ м	$d, \text{мм}$	$k$	$N, \text{мм}$
1							
2							
...							
7							

Определите погрешность измерения.

## 3. Определение диаметра отверстия

На основании задания 1 (используя длину волны  $\lambda$  лазера) определить диаметр отверстия.

Согласно критерию Рэля, два точечных некогерентных источника считаются разрешенными, если центр дифракционного пятна от одного из них совпадает с ближайшим к центру минимумом дифракционной картины от другого. Это соответствует минимальному угловому расстоянию между источниками:

$$D = \frac{1,22\lambda L}{d}$$

Самостоятельно спланируйте эксперимент, проведите необходимые измерения. Проверьте полученный результат, измерив диаметр отверстия при помощи микроскопа и окулярной шкалы.

*Контрольные вопросы к лабораторной работе 9*

1. Что такое дифракция света?
2. Как устроена дифракционная решетка?
3. Какая величина называется периодом решетки?
4. Запишите формулу для условия максимума дифракционной решетки.
5. Опишите дифракционную картину. Угол дифракции.
7. Выведите формулу для определения длины волны света с помощью дифракционной решетки.
8. Укажите, в каком случае получают максимум, а в каком минимум на дифракционной картине.
9. Как определить размер диаметра малого отверстия с помощью дифракции?
10. В чем смысл зонной теории Френеля для объяснения дифракционной картины.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10. ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА**

**Оборудование:** специальная установка, поляроиды, осветитель, измеритель интенсивности света.

### ***Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы***

Волновая теория света в начале XIX столетия получила блестящее подтверждение и развитие в трудах Френеля, Фраунгофера, Юнга и др. Теория явлений интерференции и дифракции света, созданная этими учеными, хорошо укладывалась в рамки чисто механической теории световых колебаний, предложенной еще Гюйгенсом.

Гюйгенс, а вслед за ним и другие исследователи волновой теории света, считали, что свет представляет собой распространение механических колебаний в особой среде, заполняющей все мировое пространство, – эфире. Иначе говоря, эти ученые полагали, что свет распространяется в эфире как звук в воздухе.

Открытие и изучение явления поляризации (1811 г.) привело к глубокому кризису механической волновой теории света.

Явление поляризации неопровержимо доказало поперечность световых колебаний, а механические поперечные колебания могут существовать только в твердых телах. Таким образом, эфиру как носителю световых колебаний пришлось приписывать все более нереальные и фантастические свойства.

Блестящий выход из этих затруднений был дан в 1865 г. английским ученым Максвеллом, создавшим электромагнитную теорию света.

Из основных положений этой теории следует подчеркнуть следующее:

1. Свет – это электромагнитные поля, частоты колебаний которых лежат в пределах  $4,3 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$  Гц (видимый свет).

2. Электромагнитное поле – это неразрывно связанные друг с другом переменные электрические и магнитное поля.

Вектор напряженности магнитного поля в любой момент времени перпендикулярен вектору напряженности электрического поля (рис. 44).



Рис. 44. Ориентация векторов напряженности магнитного и электрического полей в электромагнитной волне

3. Одним из основных свойств электромагнитного поля является то, что колебания, возникшие в некоторой точке пространства, не остаются локализованными в этой точке, а распространяются в пространстве со скоростью:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad \text{где} \quad c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}.$$

4. Направление распространения электромагнитных колебаний (направление луча) перпендикулярно плоскости, образованной вектором  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  (за исключением некоторых особых случаев) (рис. 44).

Следовательно, электромагнитные волны являются поперечными волнами. Из электромагнитной теории Максвелла следует два основных чрезвычайно важных при изучении явления поляризации вывода:

1. Световые волны являются поперечными волнами.

2. Свет, представляющий собой электромагнитное поле, является материей, а потому для своего распространения не требует существования другой материальной среды. Следовательно, свет может распространяться в вакууме. Элементарным излучателем света являются атомы, а в любом светящемся теле атомов огромное количество, и излучение света каждым атомом происходит независимо от друго-

го. Поэтому свет, идущий от любого источника, содержит обычно всевозможные направления колебаний электрических и магнитных полей, такой свет является естественным светом (рис. 45).

Свет, в котором направление колебаний вектора напряженности каким-либо образом упорядочено, называют *поляризованным светом*, а процесс получения поляризованного света называется *поляризацией*.

Если выделить из огромного количества световых волн, образующих естественный свет, те световые волны, колебания которых происходят в одной определенной плоскости, то такой свет будет называться *плоскополяризованным светом*.

Частично поляризованный свет – свет, в котором имеется преимущественное направление колебаний вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$ . Эти случаи схематически изображены на рисунке 45.

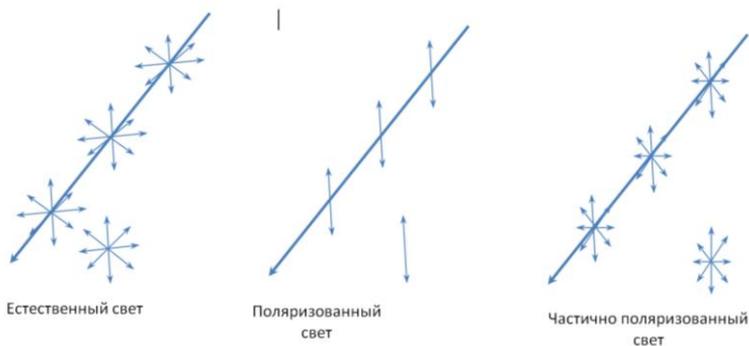


Рис. 45. Графическое представление естественного, поляризованного и частично поляризованного света

Плоскость, проходящая через вектор  $\vec{E}$  и луч, называется плоскостью поляризации (рис. 46).

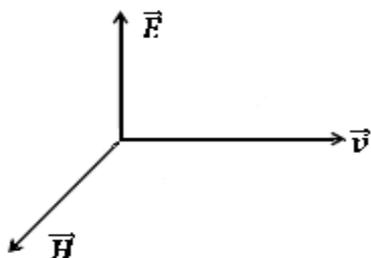


Рис. 46. Ориентация векторов электромагнитной волны

Вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы:

1. Как ориентирована плоскость поляризации по отношению к вектору  $\vec{H}$ ?
2. Что такое поляризация? Что значит «поляризованный свет»?
3. Как получить поляризованный свет?
4. Сформулируйте законы Брюстера, Малюса.
5. Что такое частично поляризованный свет? Как рассчитать степень поляризации?
6. Как отличить естественный свет, плоскополяризованный и поляризованный по кругу?

Поляризация света наблюдается при отражении, преломлении и при прохождении света через анизотропные вещества. Приборы для получения поляризованного света называются поляризаторами. Визуально поляризованный свет нельзя отличить от неполяризованного. Анализ поляризованного света делают с помощью поляризатора, через который пропускают исследуемый свет. В таких случаях поляризатор называют анализатором.

Для явления поляризации справедливы следующие законы.

1. При отражении световых лучей от поверхности изотропных диэлектриков, например, от поверхности стекла, воды и так далее, отраженные лучи оказываются частично поляризованными в плоскости, перпендикулярной плоскости падения. Степень поляризации отраженных лучей меняется при изменении угла падения. Отраженный луч будет плоско поляризован только в том случае, если угол падения имеет определенную величину  $\varphi_{\text{Бр}}$ , называемую углом полной поляризации. Теория и опыт показывают, что угол полной поляризации в этом случае удовлетворяет условию:

$$\text{tg } \varphi_{\text{Бр}} = n_{21} = n,$$

где  $n$  – относительный показатель преломления второй среды относительно первой. Это закон Брюстера. Преломленный свет всегда лишь частично поляризован.

2. Устройство, с помощью которого из естественного света выделяется поляризованный свет, называется поляризатором.

Если на анализатор падает поляризованный свет (рис. 47), то при повороте анализатора интенсивность прошедшего света изменяется от некоторого максимума до 0. Пусть  $PP$  – главная плоскость поляризатора, тогда вектор  $\vec{E}$  изображает амплитуду и направление колебаний, прошедших через поляризатор. Плоскость  $AA$  – главная плоскость анализатора. Тогда  $OB$  – направление колебаний, пропускаемых анализатором, а  $AO$  – направление колебаний, задерживаемых анализатором. Колебание  $\vec{E}$  может быть разложено на две взаимно перпендикулярные составляющие  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$ . Колебание  $\vec{E}_1$  не пройдет через анализатор, а колебание  $\vec{E}_2$  – пройдет.

$$\text{Очевидно: } E_2 = E \cdot \cos \varphi ,$$

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

Возведем обе части последнего равенства в квадрат:

$$E_1^2 = E^2 \cos^2 \varphi$$

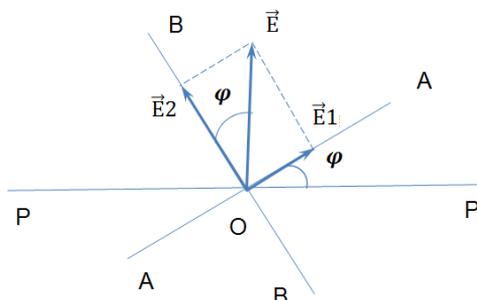


Рис. 47. Разложение вектора напряженности электрического поля на две составляющие

Интенсивность света, прошедшего через анализатор  $I = kE_2^2$

$I_0 = kE^2$  – интенсивность поляризованного света, падающего на анализатор.

Отсюда:  $I = I_0 \cos^2 \varphi$ .

Полученный закон носит название закона Малюса. Этот закон лежит в основе всех методов обнаружения поляризованного света.

Если частично поляризованный свет пропускать через анализатор, то интенсивность  $I_A$  прошедшего света будет меняться в зависимости от положения плоскости поляризации анализатора (ППА). Она достигает максимального значения  $I_{\max}$ , если ППА и плоскость преимущественных колебаний частично поляризованного света совпадают.

ет. Если эти плоскости перпендикулярны друг другу, то интенсивность света, прошедшего через поляризатор, будет минимальной  $I_{min}$ .

Для характеристики поляризованного света вводится величина, называемая степенью поляризации света  $P$ :

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

Очевидно,  $0 \leq P \leq 1$ . Для естественного света  $P = 0$ , т.к.  $I_{min} = I_{max}$ , а для плоско-поляризованного света  $P = 1$ , т.к.  $I_{min} = 0$ .

### Описание установки

Для исследования законов Брюстера и Малюса используется специальная установка, которая крепится на оптической скамье. Схема ее приведена на рис. 48.

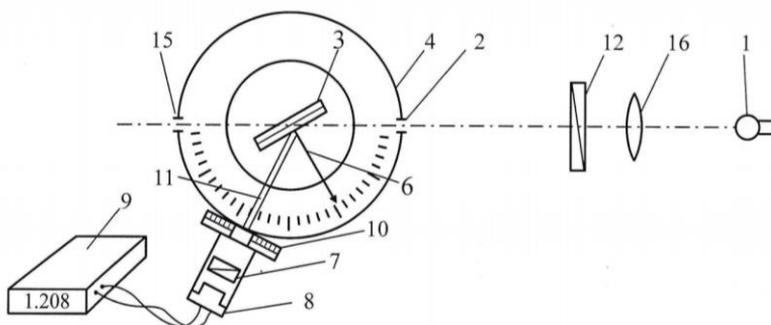


Рис. 48. Схема установки для исследования законов Брюстера и Малюса

Свет от лампы 1 через отверстие в корпусе лампы падает на стеклянную пластину 3, помещенную в фиксаторы поворотного столика. Изменение угла падения света осуществляется поворотом столика со стеклянными пластинами.

Стрелка 6 поворотного столика указывает угол падения света. К установке прилагается набор съемных стеклянных пластин, закреп-

лённых в обоймы (по 2, 4, 6, 8 штук). Отраженный от пластины частично поляризованный свет через анализатор 7 попадает на фотоэлемент 8, подключенный к измерителю интенсивности света (ИИС) 9. Показания ИИС пропорциональны световому потоку, падающему на фотоэлемент. Положение плоскости поляризации анализатора отмечается по шкале 10 с помощью указателя.

Узел анализатор – фотоэлемент закреплён на коромысле 11, которое может поворачиваться вокруг вертикальной оси на угол от  $50^\circ$  до  $180^\circ$ .

Отражающая пластина 3 может вращаться вокруг вертикальной оси, и у отраженного от нее частично поляризованного света плоскость преимущественных колебаний вертикальна. На фотоэлемент 8 попадает световой поток, зависящий от положения плоскости поляризации анализатора (ППА) 7 – он будет максимальным (показание ИИС 9 максимально), если ППА вертикальна, и минимальным, если ППА горизонтальна. Как следует из теоретических представлений, интенсивность этих двух составляющих, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях, будет меняться в зависимости от угла падения света  $\phi$  в соответствии с графиком на рис. 49.

Изменяя угол падения света на пластину и отмечая показания вольтметра, можно найти угол полной поляризации или угол Брюстера.

Для изучения закона Малюса используется дополнительный поляризатор 12.

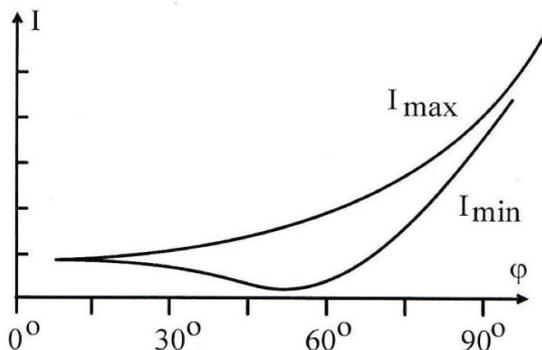


Рис. 49. График зависимости двух составляющих интенсивности света, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях, от угла падения света  $\varphi$ .

### *Знакомство с установкой и подготовка установки к работе*

1. Разберитесь с основными узлами и элементами установки:
  - а) изменение угла падения света на пластину;
  - б) изменение положения ППА;
  - в) узел анализатор – фотоэлемент.
2. Включите источник света и, вращая его вокруг вертикальной оси, добейтесь, чтобы световой луч был направлен вдоль оптической скамьи.
3. Закрепите в держателе обойму с четырьмя пластинами. Установите держатель таким образом, чтобы указатель угла поворота стоял на нулевом делении, и отраженный световой луч был направлен вдоль оптической скамьи. Контролировать правильность установки осветителя дополнительно можно по отраженному от пластины свету: пятно света, отраженное на осветитель, должно быть симметрично относительно выходного отверстия осветителя.
4. Познакомьтесь с устройством и работой анализатора и датчика интенсивности света. Для этого поверните коромысло узла анали-

затора так, чтобы свет, прошедший через пластину, попал на анализатор и фотоэлемент. Включите ИИС и подключите к нему фотоэлемент. При изменении положения плоскости поляризации анализатора (ППА) от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  величина сигнала практически не должна меняться, т.к. свет, прошедший через пластину, не поляризован.

5. Поверните отражающую пластину, задайте угол падения света  $\varphi = 25^\circ\text{--}80^\circ$ . Поворачивая коромысло, добейтесь попадания отраженного света на фотоэлемент. УСТАНОВКА ГОТОВА К РАБОТЕ!

### *Выполнение работы*

#### **1. Исследование поляризации отраженного света**

1. Используя обойму с четырьмя пластинами, исследуйте степень поляризации отраженного света. Для этого изменяйте угол падения света при положениях ППА  $0^\circ$  и  $90^\circ$ . Аналогично проведите измерения в диапазоне  $\varphi = 25^\circ\text{--}90^\circ$  для всех значений углов, указанных в таблице 11. Проведите измерения несколько раз и вычислите средние значения.

2. Для каждого угла падения рассчитайте степень поляризации отраженного света.

Таблица 11

Угол падения $\varphi$		25	30	35	40	45	50	53	55	57	59	62	65	70	75	
$I_{\max}, \text{mV}$	1															
	2															
	3															
среднее																
$I_{\min}, \text{mV}$	1															
	2															
	3															
среднее																
Степень поляризации, P																
Угол Брюстера $\varphi_{\text{Бр}} =$							Показатель преломления $n =$									

68

3. Постройте графики зависимости (в одних осях)  $I_{\max} = f(\varphi)$ ,  $I_{\min} = f(\varphi)$ ,  $P = f(\varphi)$ , по которым определите угол Брюстера.

4. Используя закон Брюстера, рассчитайте показатель преломления стекла, сопоставьте полученное значение с табличным.

## **2. Исследование поляризации света, прошедшего через пластину**

Определите зависимость степени поляризации света, прошедшего через пластину, от числа пластин.

1. Вставьте обойму с двумя пластинами ( $N = 2$ ) установите угол падения, равный углу Брюстера.

2. Установите фотоэлемент для регистрации интенсивности *прошедшего* через пластины света.

3. Определите максимальное и минимальное значения интенсивности *прошедшего* через пластины света.

4. Проведите аналогичные измерения для  $N = 4, 6, 8$ . Результаты измерений занесите в таблицу.

5. Рассчитайте степень поляризации и постройте график зависимости степени поляризации от числа пластин, через которые прошел свет:  $P = f(N)$ . Объясните полученную закономерность.

## **3. Изучение закона Малюса**

1. Установите поляризатор между источником света и узлом анализатора-фотоэлемента. Установите анализатор так, чтобы интенсивность света, прошедшего через поляризатор и анализатор, была максимальной.

2. Меняя положение плоскости поляризации анализатора (ППА) от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  через  $15^\circ$ , измерьте интенсивность света, попавшего на фотоэлемент. Результаты занесите в таблицу 12.

3. Постройте график зависимости  $I = f(\cos^2\varphi)$ , сделайте вывод о справедливости закона Малюса.

Таблица 12

$\varphi_{\text{ппа}}$	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135	150°	165°	180°
$\cos^2\varphi_{\text{ппа}}$													
Интенсивность света $I, \text{mV}$													

*Контрольные вопросы к лабораторной работе 10*

1. Чем отличается естественный свет от плоскополяризованного и частично поляризованного света?
2. Могут ли продольные волны быть плоско поляризованными?
3. Перечислите способы получения поляризованного света.
4. В чем состоит явление двойного лучепреломления?
5. Сформулируйте закон Брюстера.
6. Что такое угол Брюстера?
7. Объясните положение плоскостей поляризации отраженного и преломленного света на основе формул Френеля.
8. Покажите, что отраженный и преломленный лучи при соблюдении условия Брюстера будут взаимно перпендикулярны.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11. ИЗУЧЕНИЕ ДИСПЕРСИИ СВЕТА

**Оборудование:** источник света, набор светофильтров, исследуемая линза, экран, слайд, линейка.

### **Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы**

Дисперсия света – зависимость показателя преломления (скорости света) в среде от длины волны.

Свет, который имел бы строго определенную длину волны электромагнитных колебаний  $\lambda$  (или частоту  $\nu$ ), называется монохроматическим. В силу различных физических причин монохроматический свет является абстракцией.

Дисперсия – причина разложения в спектр белого света, а также причина одного из серьезных недостатков оптических систем – хроматической аберрации (рис. 50).

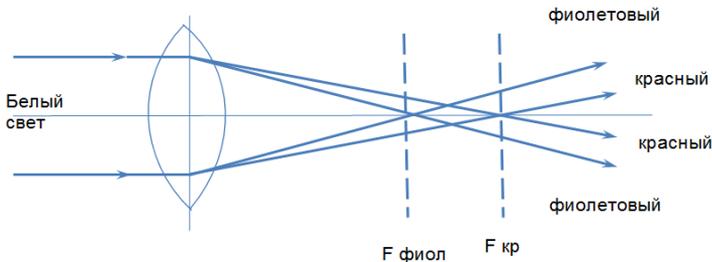


Рис. 50. Объяснение хроматической аберрации

Это значит, что немонахроматический пучок имеет совокупность фокусов, расположенных вдоль оптической оси. Или, иными словами, линза дает ряд четких изображений предмета, расположенных на разных расстояниях линзы, если изображения получают в немонахроматическом свете.

Оптическая сила линзы равна  $D = D_1 + D_2 - \frac{d}{n_2} \cdot D_1 \cdot D_2$ ,

если  $d$  (толщина линзы) много меньше радиусов кривизны  $R_1$  и  $R_2$ , то оптическая сила тонкой линзы равна:

$$D = D_1 + D_2 = (n_2 - n_1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

Таким образом, оптическая сила тонкой линзы связана с показателем преломления материала, из которого сделана линза, и радиусами кривизны  $R_1$  и  $R_2$  преломляющих поверхностей линзы.

Определяя экспериментально оптическую силу линзы для различных частей оптического спектра, можно исследовать зависимость показателя преломления от длины волны (дисперсию света). Оптическая сила линзы может быть определена экспериментально, если измерить расстояния от предмета до линзы и от линзы до изображения:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} = D.$$

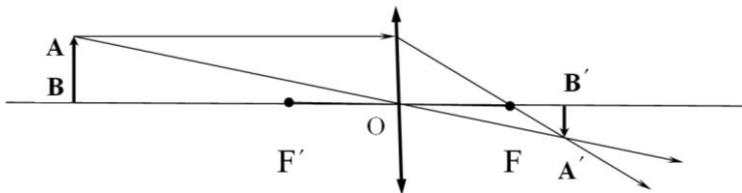


Рис. 51. Ход лучей в собирающей линзе

### Описание установки

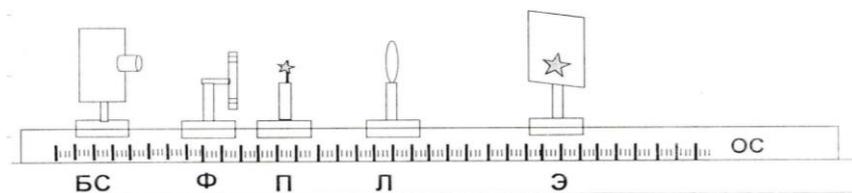


Рис. 52. Схема установки для изучения дисперсии света

На рисунке 52 представлена схема установки.

ОС – оптическая скамья;

БС – источник белого цвета;

Ф – обойма с набором светофильтров;

П – предмет;

Л – исследуемая линза;

Э – экран.

Если на оптической скамье расположить предмет на определенном расстоянии  $BO = a$  от линзы, больше фокусного расстояния, то, перемещая экран вдоль скамьи, можно получить его четкое изображение на расстоянии  $B'O = b$ .

#### *Порядок выполнения работы*

1. Установите исследуемую линзу на оптическую скамью и закрепите ее.

2. Установите в рабочее положение один из светофильтров, например, красный. Перемещая экран вдоль оптической скамьи, подберите такое его положение, при котором получается самое четкое изображение предмета.

3. Результаты запишите в таблицу 13.

4. Проведите эксперимент для всех светофильтров не менее трех раз.

5. Для каждого светофильтра рассчитайте среднее значение оптической силы линзы и показатель преломления с точностью до тысячных.

6. Постройте график зависимости показателя преломления стекла от длины волны. Сделайте вывод на основе полученного графика, обоснуйте его теоретически.

Таблица 13

$R_1 = m; R_2 = m$						$n_{ср}$
$\lambda, \text{ нм}$	№	$a, \text{ м}$	$b, \text{ м}$	$f, \text{ м}$	$D_{ср}, \text{ дптр}$	
$\lambda 1$	1					
	2					
	3					
$\lambda 2$	1					
	2					
	3					
$\lambda 3$	1					
	2					
	3					

*Контрольные вопросы к лабораторной работе 11*

1. В чем суть и физическая причина дисперсии с точки зрения электронной теории вещества?
2. Схематично изобразите нормальную и аномальную ветви дисперсионной кривой. Дайте их физическую интерпретацию.
3. Стекла́нная призма разлагает белый свет. На рисунке 53 представлен ход лучей в призме. Объясните, где правильно отражен ход лучей.

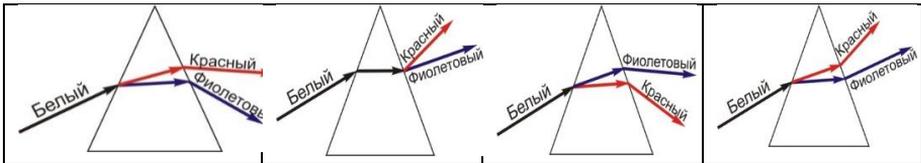


Рис. 53. Ход лучей в призме для задания 3.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 12. ИЗУЧЕНИЕ ДИСПЕРСИОННОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРИЗМЫ

**Приборы и принадлежности:** гониометр, трехгранная стеклянная призма, ртутная и водородная лампы, блок питания ламп.

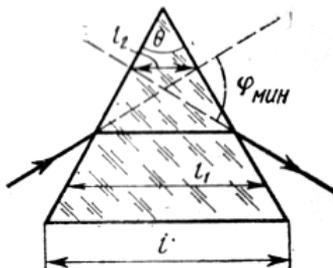


Рис. 54. Симметричный ход лучей в призме

**Цель работы:** определение показателей преломления вещества спектральной призмы и оценка ее дисперсионных характеристик.

### **Подготовка допуска к выполнению лабораторной работы**

Призма для спектрального разложения света была впервые предложена Ньютоном. *Спектральной призмой (или просто призмой)* называется многогранник, сделанный из прозрачного материала, обладающего значительной дисперсией ( $dn/d\lambda$ ). Простейшей спектральной призмой является призма треугольного сечения с параллельными ребрами (рис. 54).

При прохождении через призму пучок лучей и результате двукратного преломления отклоняется к ее основанию на некоторый угол  $\varphi$  по отношению к падающему лучу. Если через приз-

му проходит немонохроматический свет, то углы отклонения  $\varphi$  будут разными для различных монохроматических лучей вследствие того, что показатель преломления  $n$  материала призмы зависит от длины волны  $\lambda$ . Если показатель преломления возрастает уменьшением длины волны, то материал призмы имеет *нормальную дисперсию*, а призма отклоняет коротковолновые лучи (фиолетовые) больше, чем длинноволновые (красные).

Спектральные призмы используются как диспергирующие устройства во многих спектральных приборах: в монохроматорах, спектрографах, стилоскопах, спектрофотометрах и др.

При этом спектральные призмы могут иметь форму сложного многогранника или же состоят из комбинации нескольких призм. Материалом служат стекло, кварц, флюорит и др. Преломляющая способность оптического материала характеризуется в основном тремя величинами:

- показателем преломления  $n_D$  для желтой линии натрия ( $\lambda_D = 589,3$  нм);
- средней дисперсией  $\delta n = n_F - n_C$ , где  $n_F$  и  $n_C$  — показатели преломления для голубой и красной линии водорода ( $\lambda_F = 486,1$  нм,  $\lambda_C = 656,3$  нм);
- коэффициентом средней дисперсии, или числом Аббе:

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}.$$

Для полной характеристики оптических материалов определяются показатели преломления для длин волн всего оптического спектра.

В настоящей работе изучается стеклянная призма треугольного сечения. Показатель преломления такой призмы не-

трудно получить, если рассматривать ход луча в главном сечении призмы – сечении, перпендикулярном ее ребрам (при наименьшем угле отклонения  $\varphi_{\text{мин}}$ ). Учитывая закон преломления, получим:

$$n = \frac{[(\theta + \varphi_{\text{мин}})/2]}{\sin(\theta/2)},$$

где  $\varphi_{\text{мин}}$  — угол наименьшего отклонения,  $\vartheta$  — преломляющий угол призмы. Преломляющий угол призмы может быть различным, но не больше предельного значения  $\vartheta_{\text{макс}}$ :

$$\vartheta_{\text{макс}} = 2 \arcsin(1/n).$$

Если преломляющий угол призмы больше  $\vartheta_{\text{макс}}$ , то световой луч, преломившись на первой грани, упадет на вторую грань под углом, большим угла полного внутреннего отражения, и не выйдет из призмы.

Ширина спектра призмы характеризуется угловой дисперсией  $\beta$ . Обычно положение спектральной линии в спектральном аппарате задается углом отклонения, определяющим направление соответствующего светового луча. Поэтому угловую дисперсию  $\beta$  определяют как отношение разности углов отклонения  $\delta\varphi$  двух спектрально близких монохроматических пучков к разности их длин волн  $\delta\lambda$ :

$$\beta = \delta\varphi/\delta\lambda.$$

Значение  $\beta$  выражается, например, в угловых единицах на нанометр. Угловую дисперсию получим, дифференцируя выражение:

$$\beta = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{2 \cdot \sin(\theta/2)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\theta/2)}} \cdot \frac{dn}{d\lambda},$$

где  $dn/d\lambda$  — дисперсия показателя преломления в веществе призмы.

Для стекла сорта ТФ-5  $dn/d\lambda = 3200 \text{ см}^{-1}$  в синей части спектра и  $dn/d\lambda = 1170 \text{ см}^{-1}$  в красной. Если угол  $\theta = 60^\circ$ , то формула упрощается:

$$\beta = \frac{2}{\sqrt{4-n^2}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}.$$

Наличие значительной дисперсии  $\beta$  еще не обеспечивает возможности отдельного наблюдения двух близких спектральных линий  $\lambda$  и  $\lambda'$ . Раздельное наблюдение двух линий с наименьшим интервалом  $\delta\lambda$  длин волн определяется разрешающей силой призмы. Разрешающая сила зависит от дифракционных явлений на краях призмы, т.е. от ее размеров, а также от дисперсии материала призмы.

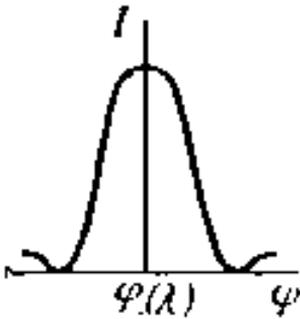


Рис. 55. Дифракционный инструментальный контур

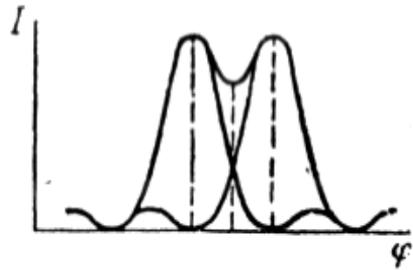


Рис. 56. Дифракционные инструментальные контуры близких спектральных линий

Согласно расчетам, спектральная призма дает для каждой спектральной линии определенный дифракционный инструментальный контур, показанный на рис. 55, который приближенно можно считать не зависящим от аберраций. Две близкие спек-

тральные линии дадут суммарный инструментальный контур (рис. 56). По оси ординат графиков отложена величина  $I$ , пропорциональная освещенности  $I$ , по оси абсцисс – угол  $\varphi$  (направление на линию спектра).

### Описание установки

Оптическая схема гониометра представлена на рис. 57. Свет от источника 1 освещает щель 2 коллиматора, которая расположена в фокальной плоскости объектива 3 коллиматора. Из объектива коллимированный пучок лучей направляется на призму 4. Из призмы диспергированный пучок лучей направляется на объектив 5 зрительной трубы. Из объектива зрительной трубы сфокусированный спектр выводится на экран 7. Фокусное расстояние объектива зрительной трубы обозначено  $F_{3,т}$ . Длинны волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  обозначены на рисунке.

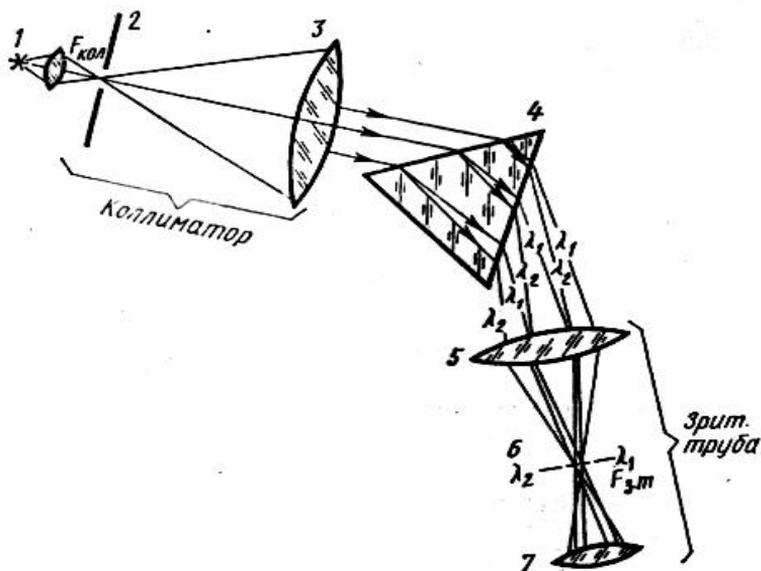


Рис. 57. Оптическая схема гониометра

Если свет немонахроматический, то после преломления в призме произойдет разложение света в спектр, причем из призмы выйдут параллельные пучки лучей, отклоненные соответственно волнам различной длины  $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ . Эти параллельные пучки соберутся в фокальной плоскости б объектива зрительной трубы 5 в виде спектра, являющегося изображением щели 2. Спектр наблюдается глазом через окуляр 7. Коллиматор и зрительная труба смонтированы на массивном основании. Коллиматор укреплен неподвижно, а зрительная труба может вращаться в горизонтальной плоскости относительно вертикальной оси основания. Исследуемая призма устанавливается на предметный столик, центрированный относительно вертикальной оси основания. Относительно той же оси центрирован горизонтальный отсчетный лимб — металлический диск с круговой шкалой. Зрительная труба может вращаться относительно вертикальной оси вместе с предметным столиком или отдельно от него. Со зрительной трубой обычно скрепляется один или два нониуса, позволяющих определить ее положение относительно лимба.

**Задание 1.** Определение габаритов призмы.

Рассчитайте наибольший возможный преломляющий угол призмы  $\theta$ , приняв приближенно  $n = 1,55$ . Сравните с действительным преломляющим углом призмы.

**Задание 2.** Определение преломляющих характеристик материала призмы и ее угловой дисперсии.

1. Установите на столик гониометра исследуемую призму так, чтобы биссектриса ее преломляющего угла была приблизительно перпендикулярна оси коллиматора. Поворачивая рукой столик с призмой в сторону основания призмы, глазом отыскать изображение щели в виде разноцветной полоски. По лимбу и

нониусу снять отсчет углов  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  для соответствующих длин волн  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ .

2. Замените ртутный источник света водородной трубкой и, проделав операции, указанные в п.1 для всех видимых линий водородного спектра, снимите отсчет углов  $\alpha'_1, \alpha'_2, \dots, \alpha'_n$  для соответствующих длин волн  $\lambda'_1, \lambda'_2, \dots, \lambda'_n$ .

3. Рассчитайте по формуле показатели преломления для всех линий ртутного и водородного спектра. По полученным данным постройте график зависимости  $n = f(\lambda)$ .

4. Используя формулы (1) и (2), рассчитайте среднюю дисперсию и коэффициент средней дисперсии  $\nu$  призмы.

5. Пользуясь графиком зависимости  $n = f(\lambda)$  и формулой  $\beta = \frac{2}{\sqrt{4-n^2}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}$ , определите значение угловой дисперсии  $\beta$  для красной и синей областей спектра.

6. Оцените возможные источники погрешностей.

#### *Контрольные вопросы к лабораторной работе 12*

1. В чем суть и физическая причина дисперсии с точки зрения электронной теории вещества?

2. Схематично изобразите нормальную и аномальную ветви дисперсионной кривой. Дайте их физическую интерпретацию.

3. Приведите примеры использования дисперсии для точных измерений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горячев, Б.В. Практические занятия по общей физике. Оптика: учебное пособие / Б.В. Горячев, С.Б. Могильницкий. – Томск: Томский политехнический университет, 2014. – 91 с. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/34698.html>

2. Иродов, И.Е. Волновые процессы. Основные законы / И.Е. Иродов. – 8-е изд. – Москва: Лаборатория знаний, 2020. – 264 с. – ISBN 978-5-00101-673-1. Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/6557.html> (дата обращения: 13.08.2020)/

3. Круглов, Ф.В. Физический практикум. Часть 4. Оптика: учебно-методическое пособие для студентов педуниверситета / Ф.В. Круглов. – Челябинск: Издательство ЧГПУ, 1999. – 63 с.

4. Лабораторный практикум по общей и экспериментальной физике: учебное пособие для вузов / В.Н. Александров, С.В. Бирюков, И.А. Васильева [и др.]; ред. Е.М. Гершензон, А.Н. Мансуров. – Москва: Академия, 2004. – 460 с. – ISBN 5-7695-1258-X.

5. Лабораторный практикум по общей физике: учебное пособие / А.Н. Варава [и др.]. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2010. – 358 с. – 978-5-383-00399-2. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/33135.html>

6. Ландсберг, Г.С. Оптика: учебное пособие для вузов / Г.С. Ландсберг. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 849 с. – ISBN 978-5-9221-0314-5. URL: <http://www.iprbookshop.ru/12949>.

7. Никитин, А.К. Курс лекций по общей физике / А.К. Никитин. – Москва: Российский университет дружбы народов, 2013. –

256 с. – ISBN 978-5-209-05180-0. – URL:  
<http://www.iprbookshop.ru/22159.html>

8. Савельев, И.В. Курс общей физики: учебное пособие для втузов: в 3 книгах. Книга 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И.В. Савельев. – Санкт-Петербург: Лань, 2019. – 468 с. – ISBN: 978-5-8114-0686-9.

9. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Том I. Механика: учебное пособие для вузов / Д.В Сивухин. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 560 с. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/25013>

10. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – Москва: Академия, 2012. – 560 с. – ISBN: 5-7695-2629-7

11. Трофимова, Т.И. Руководство к решению задач по физике: учеб. пособие для бакалавров / Т.И. Трофимова. – Москва: Юрайт, 2013.

12. Физический практикум. Часть 1. Механика: учебно-методическое пособие для студентов педуниверситета / П.В. Пекин. – Челябинск: Изд-во «Факел», 1998.

Учебное издание

**БОЧКАРЕВА ОЛЬГА НИКОЛАЕВНА**

**ПЕСИН ЛЕОНИД АБРАМОВИЧ**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ. ОПТИКА**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

ISBN

Работа рекомендована РИС ЮУрГГПУ

Протокол № 21 , 2020

Редактор Е.М. Сапегина

Технический редактор Н.А. Усова

Издательство ЮУрГГПУ

454080, Челябинск, пр. Ленина, 69

Подписано в печать 09.09.2020

Формат 60\*84/16

Объем 2,06 уч.-изд. л. (Усл. п. л. 6,1)

Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ЮУрГГПУ

454080, Челябинск, пр. Ленина, 69