

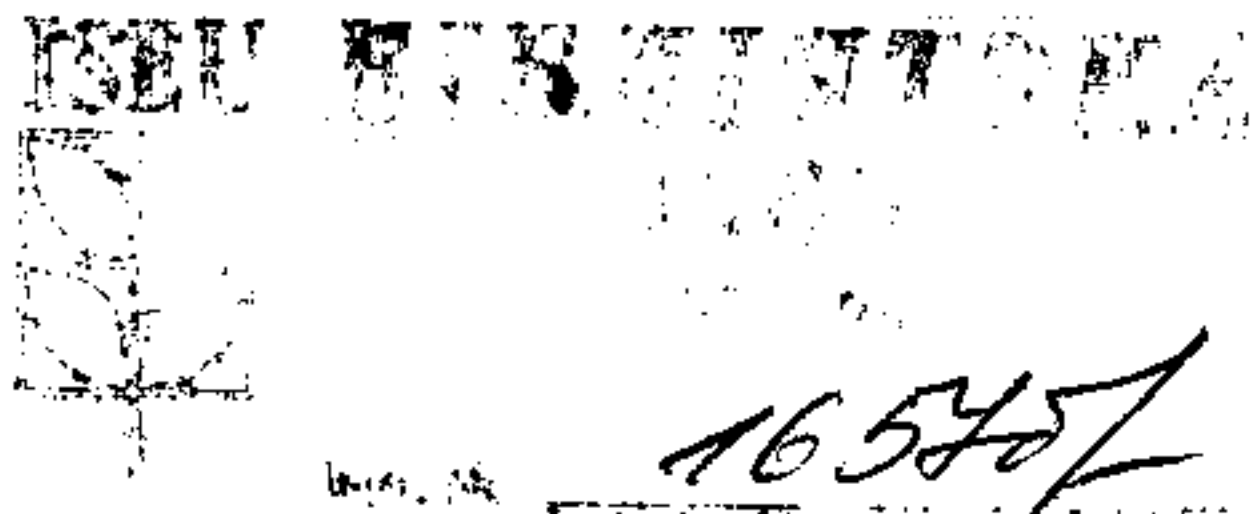
935
НЗД

Международный экологический университет им. А. Д. Сахарова

**В. И. Науменко, М. А. Силенков,
Е. В. Федоренчик, С. С. Бутенко, О. Г. Лысенко**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО КУРСУ ОПТИКИ**

Минск
2000



Издано по решению Совета Международного экологического университета
им. А. Д. Сахарова

Науменко В. И., Силенков М. А., Федоренчик Е. В. и др.

Методические указания к лабораторным работам по курсу оптики/

В. И. Науменко, М. А. Силенков., Е. В. Федоренчик, С. С. Бутенко, О. Г. Лысенко, – Мн.,
2000. – 34 с.: ил

В пособии приведено краткая теория, практическая часть и вспомогательные вопросы к лабораторным работам по курсу оптики, выполняемым в Международном экологическом университете им. А. Д. Сахарова. Все работы, за исключением работы по определению фокусного расстояния, оригинальны.

Предназначено для студентов МЭУ, но также может быть полезно преподавателям и студентам естественнонаучных и инженерно-физических специальностей других вузов.

© В. И. Науменко, М. А. Силенков, Е. В. Федоренчик, С. С. Бутенко, О. Г. Лысенко, 2000

© Международный экологический университет им. А. Д. Сахарова, 2000

Лабораторная работа № 1

Молекулярная рефракция

Цель работы: изучить рефрактометр Аббе; приобрести навыки по измерению показателя преломления; разобраться с понятием молекулярной рефракции; определить неизвестную концентрацию некоторого раствора с помощью построения калибровочного графика зависимости показателя преломления от концентрации; определить плотность некоторой жидкости через измерение показателя преломления и расчет молекулярной рефракции.

Принадлежности: рефрактометр, осветитель, набор водных растворов глицерина с различными концентрациями, набор органических растворителей, протирочная вата, стеклянная палочка.

Общие сведения

Молекулярная рефракция – это физическая величина, характеризующая поляризуемость молекулы, а точнее – $1/3$ моля вещества. Ее измерение основано на измерении показателя преломления и плотности вещества. *Показатель преломления* является характеристикой явления, называемого рефракцией (преломлением) света. Это явление представляет собой изменение направления световых лучей в среде с переменным показателем преломления n . Частный случай резкого изменения направления лучей на границе раздела двух сред с разными n называется *преломлением света*. Причиной этих явлений с точки зрения классической физики является взаимодействие электрического поля световой волны с элементарными зарядами. В электрическом поле электрон, находящийся на внешней орбите, смещается от положения равновесия, и атом (молекула) приобретает индуцированный дипольный момент ($p = \alpha E$, где α – поляризуемость атома (или молекулы), E – напряженность электрического поля падающей волны), изменяющийся во времени с частотой падающего света и служащий источником вторичных когерентных волн. Поле этих волн складывается с полем исходной световой волны и служит причиной изменения скорости результирующей электромагнитной волны. Классическая электронная теория позволяет связать показатель преломления вещества с микроскопическими характеристиками среды – плотностью и электронной поляризуемостью, зависящей от природы атомов или молекул и частоты света.

Через микроскопические характеристики выражают обычно не сам показатель преломления, а связанную с ним молекулярную рефракцию:

$$R = M r = M f(n)/\rho = N_A \alpha/3, \quad (1.1)$$

где R – молекулярная рефракция [$\text{см}^3/\text{моль}$],

M – молекулярная масса [г/моль],

ρ – плотность [г/см³],

$N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ – число Авогадро [моль⁻¹],

$$r = \frac{f(n)}{\rho} - \text{удельная рефракция [см}^3/\text{г]}.$$

Разные модели строения вещества приводят к несколько различным выражениям для функции $f(n)$; чаще всего применяется формула Лоренц-Лорентца, согласно которой $f(n) = \frac{(n^2 - 1)}{(n^2 + 2)}$. Здесь использована не система СИ, а старая система СГС, в соответствии с которой приведены данные в большинстве химических справочников. Как видно из последней части формулы (1.1), молекулярная рефракция не зависит от температуры и плотности, а, следовательно, давления и агрегатного состояния и является мерой только поляризуемости α молекул:

$$R = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{M}{\rho} = \frac{1}{3} N_A \alpha, \quad (1.2)$$

то есть является характеристикой собственнохимического соединения. Значения R в видимой области спектра характеризуют поляризуемость электронных оболочек молекул вещества. Если при растворении не изменяется поляризуемость компонентов, то рефракция растворов складывается из R_i рефракции компонентов:

$$R = \sum_i x_i R_i \quad (1.3)$$

где x_i — концентрация i -го компонента в мольных долях.

Правило аддитивности молекулярных рефракций растворов позволяет вычислить R растворенных твердых веществ. Более того, аддитивность молекулярной рефракции приблизительно соблюдается и для чистых соединений. Для ионных соединений она равна сумме ионных рефракций (см. табл.1 в Приложении).

Пример 1. Хлорид калия

Расчетная $R_{\text{теор}}(\text{KCl}) = R(\text{K}^+) + R(\text{Cl}^-) = 2,2 + 8,7 = 10,90$;

Молярная масса $M(\text{KCl}) = 74,56$ г/моль;

Плотность $\rho(\text{KCl}) = 1,985$ г/см³;

Показатель преломления для желтой линии D натрия при температуре 20 градусов по Цельсию $n_D^{20}(\text{KCl}) = 1,490$; тогда рассчитанная из

$$\text{эксперимента } R_{\text{эксп}}(\text{KCl}) = \frac{(n^2 - 1)}{(n^2 + 2)} \frac{M}{\rho} = \frac{(1,490^2 - 1)}{(1,490^2 + 2)} \frac{74,56}{1,985} = 10,86.$$

Получаем погрешность $\Delta R = 0,04$ и относительную погрешность $\frac{\Delta R}{R} \approx 4 \cdot 10^{-3}$ или 0,4%.

Молекулярная рефракция соединений с валентными связями может быть представлена в виде суммы атомных рефракций (см. табл.2 в Приложении).

Пример 2. н-Пентан $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$

$R_{\text{теор}}(\text{C}_5\text{H}_{12}) = 5R(\text{C}) + 12R(\text{H}) = 5 \cdot 2,418 + 12 \cdot 1,100 = 25,290$; $M(\text{C}_5\text{H}_{12}) = 72,15$ г/моль;

$$\rho(C_5H_{12}) = 0,62619 \text{ г/см}^3;$$

$$n_D^{20}(C_5H_{12}) = 1,35769; \quad \text{то} \quad R_{\text{практ}}(C_5H_{12}) = \frac{(1,35769^2 - 1) \cdot 72,15}{(1,35769^2 + 2) \cdot 0,62619} = 25,282. \quad \text{Получаем}$$

погрешность определения R : $\Delta R = 0,008$ и относительную погрешность $\frac{\Delta R}{R} \approx 3 \cdot 10^{-4}$ или 0,03%.

Фигурирующие в подобных расчетах атомные рефракции частично включают эффекты взаимного влияния атомов и не равны атомным рефракциям соответствующих простых веществ. Влияние структуры молекулы на молекулярную рефракцию учитывается путем введения различных значений атомных рефракций для одного и того же элемента в различных группировках (например, различные атомные рефракции для кислорода в эфирах, спиртах и карбоксильных соединениях (см. табл.2 в Приложении), или путем применения групповых рефракций (например, групповые рефракции групп NO, NO₂, CN и т.д.), а также путем использования специальных инкрементов (т.е. приращений) для кратных связей (двойная связь C=C, тройная связь C≡C).

Вместо атомных и групповых рефракций часто применяются рефракции связей, причем молекулярная рефракция разлагается на слагаемые по числу и типам связей, которым условно приписывается и поляризуемость электронов, не участвующих в образовании связей (см. табл.3 в Приложении).

Пример 3. 1-Бромпропан CH₃-CH₂-CH₂-Br

$$R_{\text{теор}}(C_3H_7Br) = 7R(C-H) + 2R(C-C) + R(C-Br) = 7 \cdot 1,70 + 2 \cdot 1,21 + 9,47 = 23,79; \quad M(C_3H_7Br) = 123,00 \text{ г/моль};$$

$$\rho(C_3H_7Br) = 1,353 \text{ г/см}^3;$$

$$n_D^{20}(C_3H_7Br) = 1,4344;$$

$$R_{\text{практ}}(C_3H_7Br) = 23,69. \quad \text{Получаем погрешность определения молекулярной рефракции } \Delta R = 0,10 \text{ и относительную погрешность } \frac{\Delta R}{R} = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ или } 0,42\%.$$

Пример 4. 2-Бромпропан CH₃-CHBr-CH₃

$$R_{\text{теор}}(C_3H_7Br) = 23,79 \text{ (т.к. число и качество связей такое же, как и в 1-бромпропане);}$$

$$M(C_3H_7Br) = 123,00 \text{ г/моль};$$

$$\rho(C_3H_7Br) = 1,310 \text{ г/см}^3;$$

$$n_D^{20}(C_3H_7Br) = 1,4256;$$

$$R_{\text{практ}}(C_3H_7Br) = 24,04. \quad \text{Получаем погрешность определения молекулярной рефракции } \Delta R = 0,25 \text{ и относительную погрешность } \frac{\Delta R}{R} = 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ или } 1,04\%.$$

Нельзя сказать, что в какой-то схеме (по атомам или по связям) аддитивность выполняется лучше. Обе они приблизительно равнозначны в пределах границ применимости аддитивной схемы для молекулярной рефракции.

Пример 5: Бромформ CH₃Br

$$R_{\text{практ}}(CH_3Br) = \frac{(1,5977^2 - 1) \cdot 252,75}{(1,5977^2 + 2) \cdot 2,8912} = 29,814;$$

По атомам $R_{\text{теор}}(\text{CH}_3\text{Br}) = R(\text{C}) + 3R(\text{H}) + R(\text{Br}) = 2,418 + 1,100 + 8,865 = 12,383$ (см. табл.2 в Приложении);

По связям $R_{\text{теор}}(\text{CH}_3\text{Br}) = 3R(\text{C-H}) + R(\text{C-Br}) = 1,70 \cdot 3 + 9,47 = 14,57$ (см. табл.3 в Приложении);

$\Delta R \approx 0,18$ и $\frac{\Delta R}{R} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ или 0,15%.

Иногда суммирование молекулярной рефракции по связям дает несколько лучшие результаты, чем суммирование по атомам.

Пример 6: Этиловый спирт

$$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH } R_{\text{факт}}(\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}) = \frac{(13613^2 - 1) \cdot 46,07}{(13613^2 + 2) \cdot 0,7893} = 12,923;$$

$R_{\text{теор}}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 2R(\text{C}) + 6R(\text{H}) + R(\text{O в спиртовой группе}) = 12,691$ (см. табл.2 в Приложении);

$R_{\text{теор}}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 5R(\text{C-H}) + R(\text{C-C}) + R(\text{C-O}) + R(\text{O-H}) = 13,05$ (см. табл.3 в Приложении);

По атомам $\Delta R \approx 0,018$ и по связям $\Delta R \approx 2 \cdot 10^{-3}$;

Соответственно и $\frac{\Delta R}{R} = 0,018$ (1,8%) и $2 \cdot 10^{-3}$ (0,2%).

Сопоставление экспериментального значения молекулярной рефракции с вычисленным по аддитивным схемам – один из простейших физических методов определения строения химических соединений. Этим методом может быть получено подтверждение брутто-формулы вещества и наличия определенных функциональных групп, (например, может быть получена информация о числе колец в молекуле, числе, природе и расположении кратных связей и т.д.). В некоторых случаях возможны также заключения о цис- или транс-конфигурации молекулы.

Рефрактометры

Рефрактометры — это приборы для измерения показателя преломления света n . Методы измерения, лежащие в основе работы рефрактометров различных типов, можно разделить на:

- основанные непосредственно на законе преломления света (преломление лучей в призме, полное внутреннее отражение);
- интерференционные;
- основанные на формулах Френеля;
- теневые;
- дисперсионно-аналитические (в том числе метод Крамерса-Кронига).

Рассмотрим только первую группу методов. Эти методы (метод измерения угла полного внутреннего отражения и метод измерения предельного угла преломления) применяются в технических рефрактометрах. Исследуемое вещество (твердое тело или жидкость) приводится в оптический контакт с одной из граней призмы с известным показателем преломления n_0 , большим, чем показатель преломления исследуемого вещества. Для этого одна поверхность у твердого тела делается плоской и полируется, а между соприкасающимися плоскостями измерительной призмы и исследуемого тела

помещают каплю жидкости (растекающуюся в тонкий плоско-параллельный слой) с показателем преломления несколько большим, чем у исследуемого тела. При измерении показателя преломления жидкости ее наливают в прозрачный сосуд без дна, установленный на поверхности призмы. На рис.1 проиллюстрированы оба метода, которые рассмотрим подробнее.

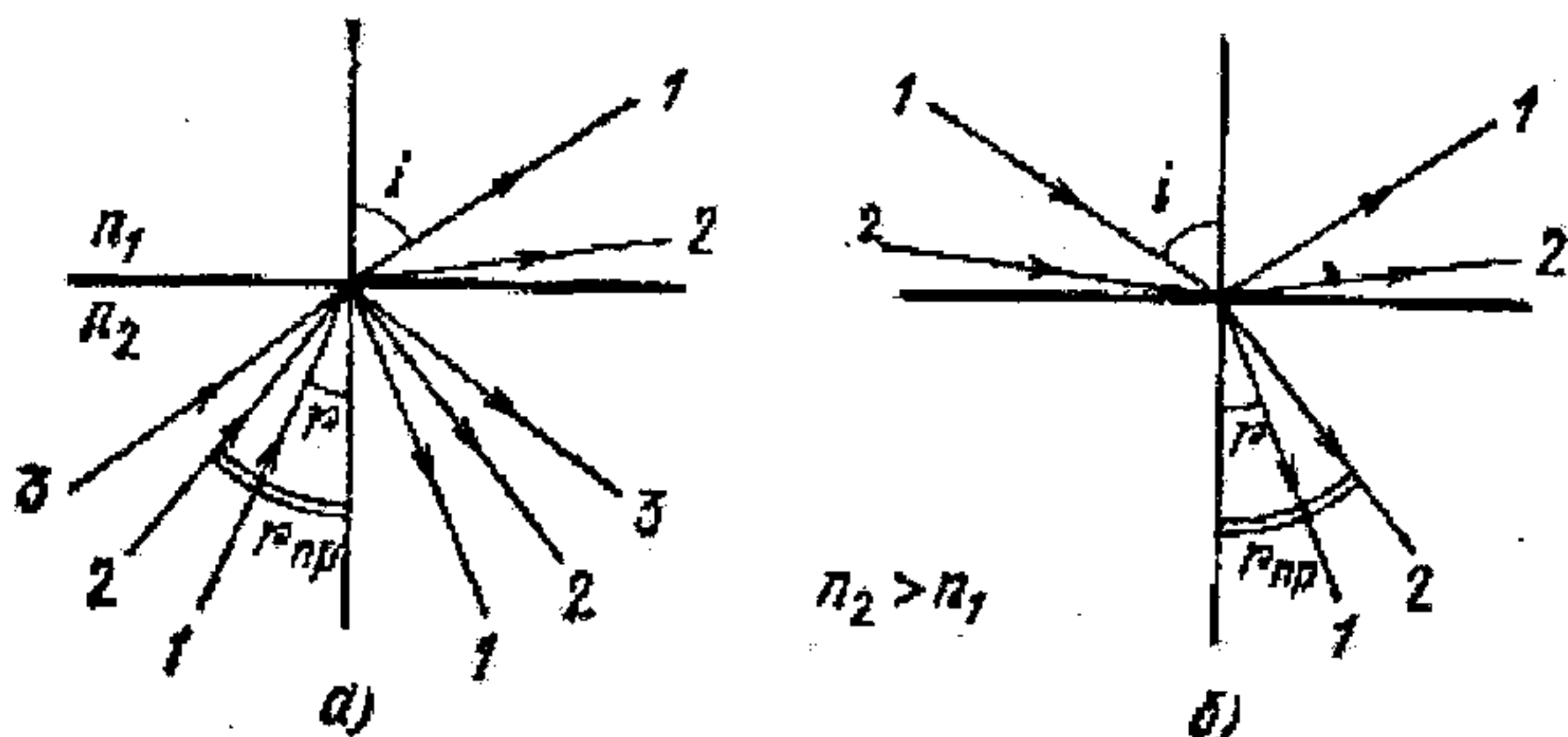


Рис.1. Метод угла полного внутреннего отражения (а); метод предельного угла преломления (б)

а) Граница раздела "призма - исследуемое вещество" освещается широким пучком со стороны призмы (на рисунке — снизу). При таком освещении лучи, падающие на границу раздела под углом $i > i_{кр}$, претерпевают полное внутреннее отражение и поэтому полностью отражаются внутрь призмы. Лучи же с углом $i < i_{кр}$ частично преломляются и частично отражаются. Преломленные лучи попадают в зрительную трубу, через которую можно наблюдать резкую границу света и полутени; положение этой границы, очевидно, определяется углом $i_{кр}$.

б) Граница раздела "призмы - исследуемое вещество" освещается широким пучком света со стороны исследуемого образца (на рисунке — сверху) и измеряется угол $i_{кр}$ - предельный угол преломления, соответствующий углу падения $i = 90^\circ$. Преломленные лучи наблюдаются в зрительную трубу, с помощью которой определяют угловое положение границы между светом и тенью; это положение очевидно и тут задается углом $i_{кр}$.

Метод (а) пригоден только для прозрачных сред. Метод (б) может применяться также и для слабо поглощающих веществ.

Такие принципы измерения заложены в основу конструкции лабораторных рефрактометров Аббе (ИРФ-22) и Пульфриха (ИРФ-53). В данной лабораторной работе используется только рефрактометр Аббе.

Устройство рефрактометра Аббе

Оптическая схема рефрактометра Аббе представлена на рис. 2 и 3. Основной частью являются две стеклянные прямоугольные призмы P_1 и P_2 , изготовленные из стекла с большим показателем преломления. В разрезе призмы имеют вид прямоугольных треугольников, обращенных друг к другу гипотенузами; зазор между призмами имеет ширину около 0,1 мм и служит для помещения исследуемой жидкости (исследование твердых веществ требует дополнительных приспособлений). Измерения на рефрактометре могут производиться по двум методам: скользящего луча (методу предельного угла преломления) и полного внутреннего отражения.

Ход лучей при работе по методу скользящего луча изображен на рис.2.

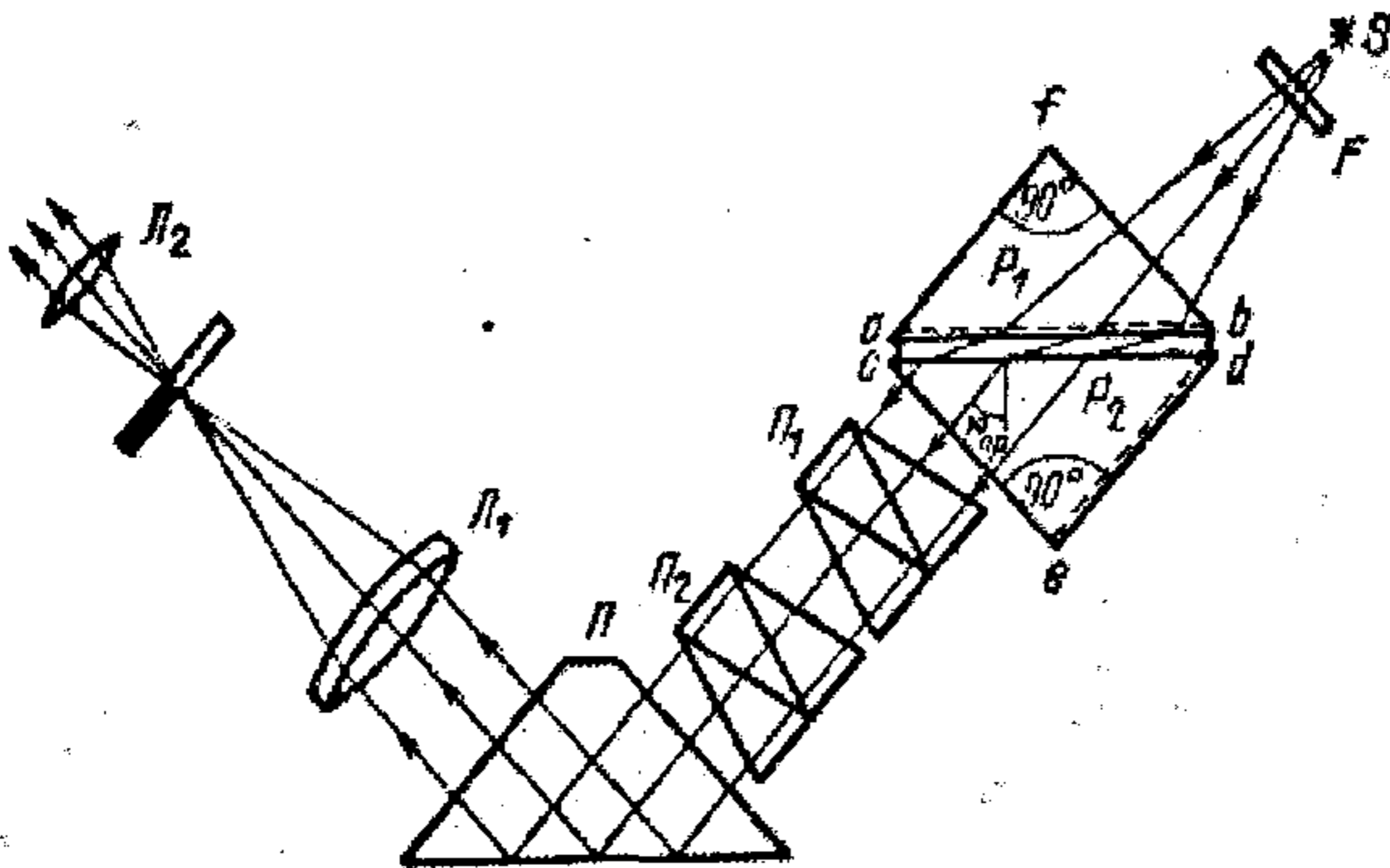


Рис.2. Ход лучей в рефрактометре при измерении показателя преломления жидкости по методу скользящего луча

Свет проникает в призму P_1 через грань fb и попадает в жидкость через матовую грань ab . Свет, рассеянный матовой поверхностью, проходит слой жидкости и под всевозможными углами ($0^\circ \leq i \leq 90^\circ$) попадает на сторону cd призмы P_2 .

Скользящему лучу в жидкости ($i = 90^\circ$) соответствует предельный угол преломления $\varphi_{гр}$. Преломленные лучи с углами, большими $\varphi_{гр}$, в жидкости не возникают.

Если свет, выходящий из грани cd , пропустить через собирающую линзу L_1 , то в ее фокальной плоскости будет наблюдаться резкая граница света и тени. Граница рассматривается с помощью линзы L_2 . Линзы L_1 и L_2 образуют зрительную трубу, установленную на бесконечность. В их общей фокальной плоскости установлено перекрестие из тонких нитей. Положение границы в фокальной плоскости зависит от

показателя преломления жидкости. Поворачивая трубу относительно оси, проходящей через слой жидкости и перпендикулярной рисунку, можно совместить границу света и тени с центром перекрестия. При этом измерение показателя преломления жидкости сводится к измерению угла, образованного нормалью к грани cd и оптической осью зрительной трубы. В современных приборах труба укрепляется неподвижно, а поворачивается оправа с призмами. С оправой соединена подсвечиваемая шкала, которая градуируется непосредственно в значениях показателя преломления.

При измерении показателя преломления жидкости методом полного отражения призму F_2 освещают со стороны грани ed (рис.3), которая делается матовой. Свет в этом случае попадает на границу раздела cd под всевозможными углами. При $r < r_{гр}$ свет отражается лишь частично. В поле зрения трубы наблюдается при этом резкая граница света и полутени.

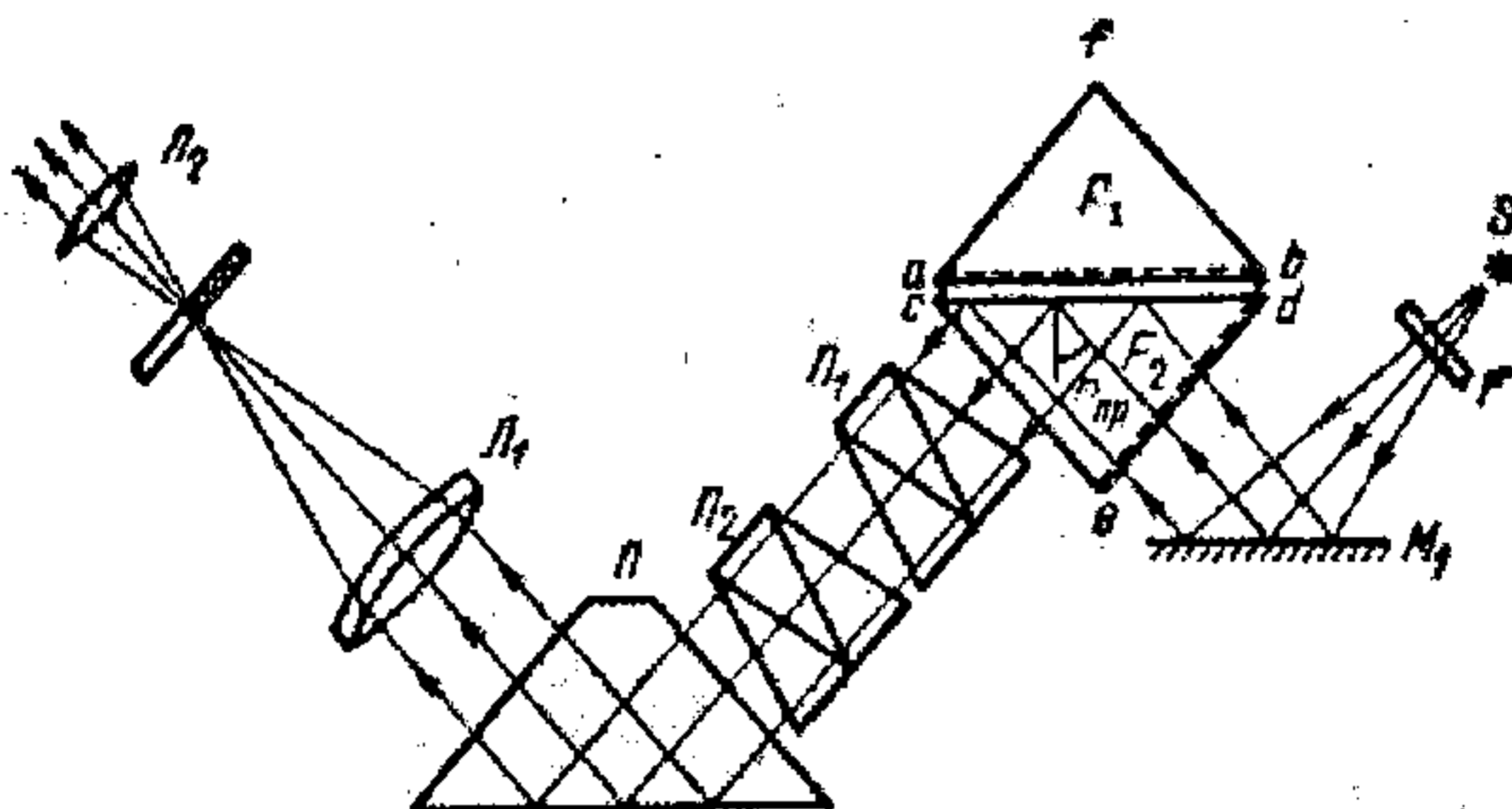


Рис.3. Ход лучей в рефрактометре при измерении показателя преломления жидкости методом полного внутреннего отражения

Так как условия, определяющие величину предельного угла в методе скользящего луча и в методе полного внутреннего отражения, совпадают, положение линии раздела в обоих случаях также оказывается одинаковым.

Изложенная теория рефрактометра Аббе, строго говоря, справедлива лишь в том случае, когда свет является монохроматическим. Дисперсия показателей преломления исследуемого вещества и стекла призм приводит к тому, что величина предельных углов $r_{гр}$ и $\varphi_{гр}$ зависит от длины волны λ . При работе с белым светом наблюдаемая в поле зрения граница света и тени (или света и полутени) часто оказывается размытой и окрашенной. Для того, чтобы получить и в этом случае резкое изображение, перед объективом трубы помещают компенсатор с переменной дисперсией. Компенсатор содержит две одинаковые дисперсионные призмы Амичи (призмы Π_1 и Π_2 на рис.2 и 3), каждая из которых состоит из трех склеенных призм, обладающих различными показателями преломления и различной дисперсией. Призмы рассчитываются так, чтобы монохроматический луч с длиной волны $\lambda_D = 589,3\text{нм}$ (среднее значение длины

волны желтого дублета натрия) не испытывал отклонения. Лучи с другими длинами волн отклоняются призмой в ту или иную сторону. В зависимости от взаимной ориентации призм дисперсия компенсатора изменяется в пределах от нуля до удвоенного значения дисперсии одной призмы.

Для поворота призм относительно друг друга служит специальная рукоятка и система конических шестерен, с помощью которых призмы одновременно поворачиваются в противоположных направлениях. Вращая ручку компенсатора, следует добиваться того, чтобы граница света и тени в поле зрения стала достаточно резкой и не окрашенной. Положение границы при этом соответствует длине волны λ_D , для которой обычно и приводятся в справочниках значения показателя преломления n_D для различных веществ.

Приступая к измерениям, необходимо убедиться в правильной работе прибора. Такую проверку проще всего выполнить, измерив показатель преломления вещества с известным показателем преломления. В качестве такого вещества можно взять, например, дистиллированную воду, для которой (при $T=20\text{ }^\circ\text{C}$) $n_D^{20}=1.33291$. Если измерение дает другой результат, следует определить поправку к шкале.

При визуальном совмещении границы раздела света и тени с перекрестием нитей наблюдатель допускает небольшие ошибки, в результате которых измеренные значения для одного и того же вещества в разных опытах не вполне точно совпадают между собой (случайный разброс). Поэтому рекомендуется в каждом случае проводить несколько измерений показателя преломления и определять среднее значение.

Порядок работы с рефрактометром

1. Перед работой откидывают верхнюю часть измерительной головки. На поверхность измерительной призмы пипеткой или стеклянной палочкой наносят несколько капель исследуемой жидкости и осторожно закрывают головку. Через окно P_1 (рис.4) наблюдают, полностью ли исследуемая жидкость заполнила зазор между осветительной и измерительной призмами.

2. Осветительное зеркало M_1 устанавливают так, чтобы свет от источника через окно P_2 поступал в осветительную призму и равномерно освещал поле зрения.

3. Глядя в окуляр зрительной трубы и вращая маховичок H_1 , находят границу раздела света и тени. Маховичком H_2 устраняют ее окрашенность. Затем маховичком H_3 точно совмещают границу раздела с перекрестием нитей и снимают отсчет по шкале показателей преломления.

4. После каждого опыта рабочую поверхность прибора и стеклянную палочку тщательно протирают растворителем и высушивают.

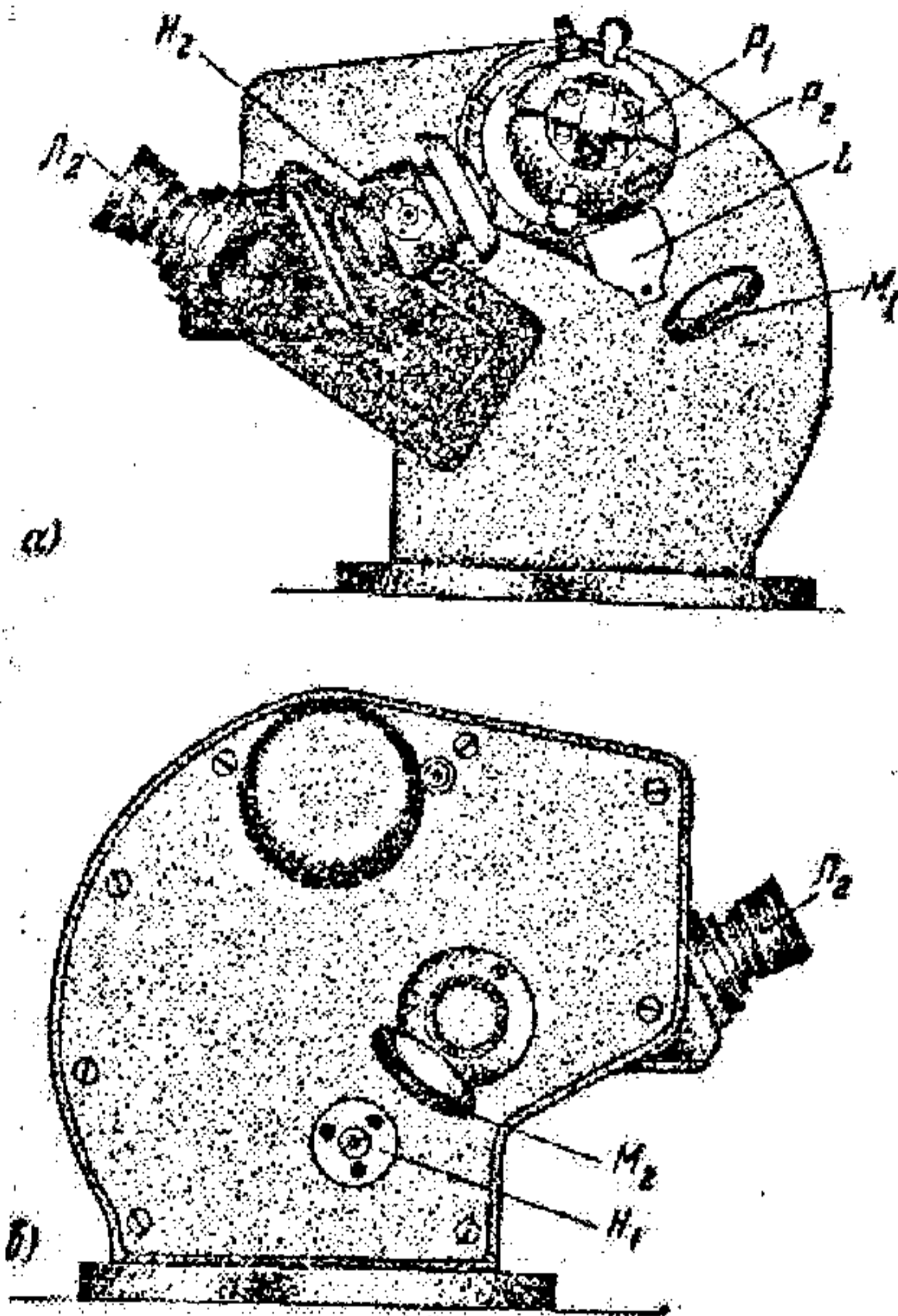


Рис.4. Рефрактометр Аббе

Практическая часть

1. Ознакомиться с теоретической частью работы.
2. Ознакомиться с устройством и принципом работы рефрактометра Аббе.
3. Выполнить задание №1 "Определение случайной и систематической ошибки рефрактометра Аббе" :

3.1. Измерить показатель преломления n_D^{20} дистиллированной воды не менее пяти раз; по методу предельного угла преломления

3.2. Вычислить случайную погрешность прибора с учётом его абсолютной погрешности, равной половине деления шкалы прибора;

3.3. Вычислить систематическую ошибку прибора, считая, что показатель преломления дистиллированной воды равен $n_D^{20}=1,33291$.

4. Выполнить задание №2 "Определение неизвестной концентрации глицерина в водном растворе":

4.1. Измерить показатели преломления n_D^{20} для водных растворов глицерина с известными концентрациями;

4.2. Построить калибровочный график в координатах n_D^{20} и C (концентрация глицерина). При построении предполагать линейную зависимость между n_D^{20} и C (что действительно выполняется в заданных небольших пределах изменения n_D^{20}). Выбрать при этом для калибровочного графика прямую, наилучшим образом укладывающуюся на экспериментальные точки;

4.3. Измерить показатель преломления n_D^{20} раствора глицерина с неизвестной концентрацией;

4.4. Определить неизвестную концентрацию глицерина, используя калибровочный график;

4.5. Оценить погрешность определения концентрации, учитывая, что точность измерения показателя преломления намного лучше, чем точность задания калибровочных концентраций; следует измерить отклонения δ_i всех заданных калибровочных значений концентрации от значений, определяемых соответствующими точками на графике. Оцениваемую погрешность вычислить по формуле:

$$\delta_c = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{N}}, \quad \text{где } N \text{ — число точек на графике.}$$

5. Выполнить задание №3 "Определение плотности чистого ацетона":

5.1. Измерить показатели преломления n_D^{20} для указанных ниже в таблице чистых веществ (измерения проводить 3–5 раз для каждого вещества);

Название вещества	структурная формула	$\rho \pm \delta_\rho$, г/см ³	$M \pm \delta_M$, г/моль
вода	H-O-H	0,9982±0,0012	18,02±0,01
Этиловый спирт	CH ₃ -CH ₂ -OH	0,7893±0,003	46,07±0,01
глицерин	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-CH-CH}_2 \\ \quad \quad \\ \text{OH} \text{ OH} \text{ OH} \end{array}$	1,258±0,003	92,09±0,01
ацетон	$\begin{array}{c} \text{CH}_3\text{-C-CH}_3 \\ \\ \text{O} \end{array}$?	58,08±0,01

5.2. Вычислить молекулярные рефракции $R_{\text{практ}}$ для этих веществ (кроме ацетона) по формуле:

$$R = M \cdot r = M \frac{f(n)}{\rho} \left[\frac{\text{см}^3}{\text{моль}} \right];$$

5.3. Вычислить погрешности δ_{R_i} , используя значения δ_ρ и δ_M из таблицы выше;

5.4. Используя данные (табл. 2 и 3 в Приложении), вычислить молекулярные рефракции $R_{\text{теор}}$ для этих веществ (включая ацетон) по системе рефракций связей и атомных рефракций по формулам: $R = \sum_i f_i R_{i_ат}$, и $R = \sum_i k_i R_{i_св}$, где f_i , k_i –

количество структурных компонентов одного сорта в молекуле; $R_{i\text{ сс}}$, $R_{i\text{ атом}}$ – соответственно рефракции связей (табл. 3) и атомные рефракции (табл. 2) этих структурных компонентов;

правильное уравнение $\frac{\Delta F}{F}$

5.5. Сопоставить $R_{\text{теор}}$ с $R_{\text{практ}}$ (используя данные из примеров в теоретической части) для исследованных веществ. В случае хорошей сходимости положить для

ацетона, что $R_{\text{теор}} = R_{\text{практ}}$ с точностью $\delta_R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\delta_i^2 + (R_{i\text{ практ}} - R_{i\text{ теор}})^2 \right]}$, где δ_i –

погрешности δ_{R_i} , определенные в пункте 5.3 для исследованных веществ;

5.6. Вычислить плотность ацетона по формуле связи молекулярной рефракции с плотностью, молярной массой и показателем преломления и оценить погрешность измерения, приравняв ее к δ_{R_i}

5.7. Занести полученные данные в таблицу:

N_n	название вещества	Структурная формула	$\rho \pm \delta_\rho$ г/см ³	$M \pm \delta_M$ г/моль	$n_D^{20} \pm \delta_n$	$R_{\text{практ}} \pm \delta_R$ см ³ /моль	$R_{\text{теор}}$

6.0 Измерьте показатель преломления воды по методу полного внутреннего отражения.

Приложение

Таблица 1

Ионные рефракции R_0

F ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	I ⁻
2,50	8,70	12,20	18,50

Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Sr ²⁺	Ba ²⁺
0,50	2,20	1,35	2,30	4,30

Таблица 2

Атомные рефракции R_0 по Эйзенлору

C	2,418	O (кислород)	
H	1,100	в гидроксилах	1,525
F	0,997	в эфирах	1,643
Cl	5,967	в карбонилах	2,211
Br	8,865	N в аминах	
I	13,900	первичных	2,322
двойная связь		вторичных	2,502
C=C	1,733	третичных	2,840
тройная связь		NO ₂	6,718
C≡C	2,391	CN	6,136

Таблица 3

Рефракции связей R_0

C-C	1,21	C-H	1,70
C=C	4,15	C-Cl	6,57
C≡C	6,03	C-Br	9,47
		C-I	14,51
C-O	1,425	C=S	10,61
C=O	3,42	O-H	1,88
C-N	1,55	N-H	1,88
C=N	3,76		

Контрольные вопросы

1. Что такое молекулярная рефракция?
2. Почему R считается характеристикой только молекулярного строения вещества?
3. Почему в рассматриваемых явлениях учитывается поляризация только за счет смещения электронов, а не за счет смещения атомов друг относительно друга или поворота молекул?
4. Чем определяется измерительный диапазон показателя преломления в методе полного внутреннего отражения и методе скользящего луча? Почему в одном приборе используются оба метода?
5. Какой самый большой показатель преломления можно измерить на конкретном рефрактометре?
6. Что означает выражение: относительный показатель преломления больше единицы?

Литература

1. Ландсберг Г. С. Оптика. М.: Наука, 1976.
2. Волькенштейн М. В. Молекулярная оптика. М. – Л: ГИТТЛ, 1951.
3. Гольдин Л. Л, Игошин Ф. Ф., Козел С. М и др. Лабораторные занятия по физике. Учебное пособие. М.: Наука, 1983.

Лабораторная работа № 2

Определение фокусного расстояния линзы

Цель работы: изучить законы геометрической оптики; исследовать характер действия оптических линз, получить навыки проведения простейших оптических измерений; научиться определять фокусные расстояния положительных и отрицательных линз.

Принадлежности: оптическая скамья, положительная и отрицательная линзы, осветитель, экран, линейка.

Общие сведения

Главное фокусное расстояние f собирающей линзы можно определить по формуле:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (2.1)$$

где a – расстояние от предмета A до оптического центра O линзы L (рис. 5), b – расстояние от оптического центра O линзы L до резкого изображения этого предмета A' на экране. *или, еще*

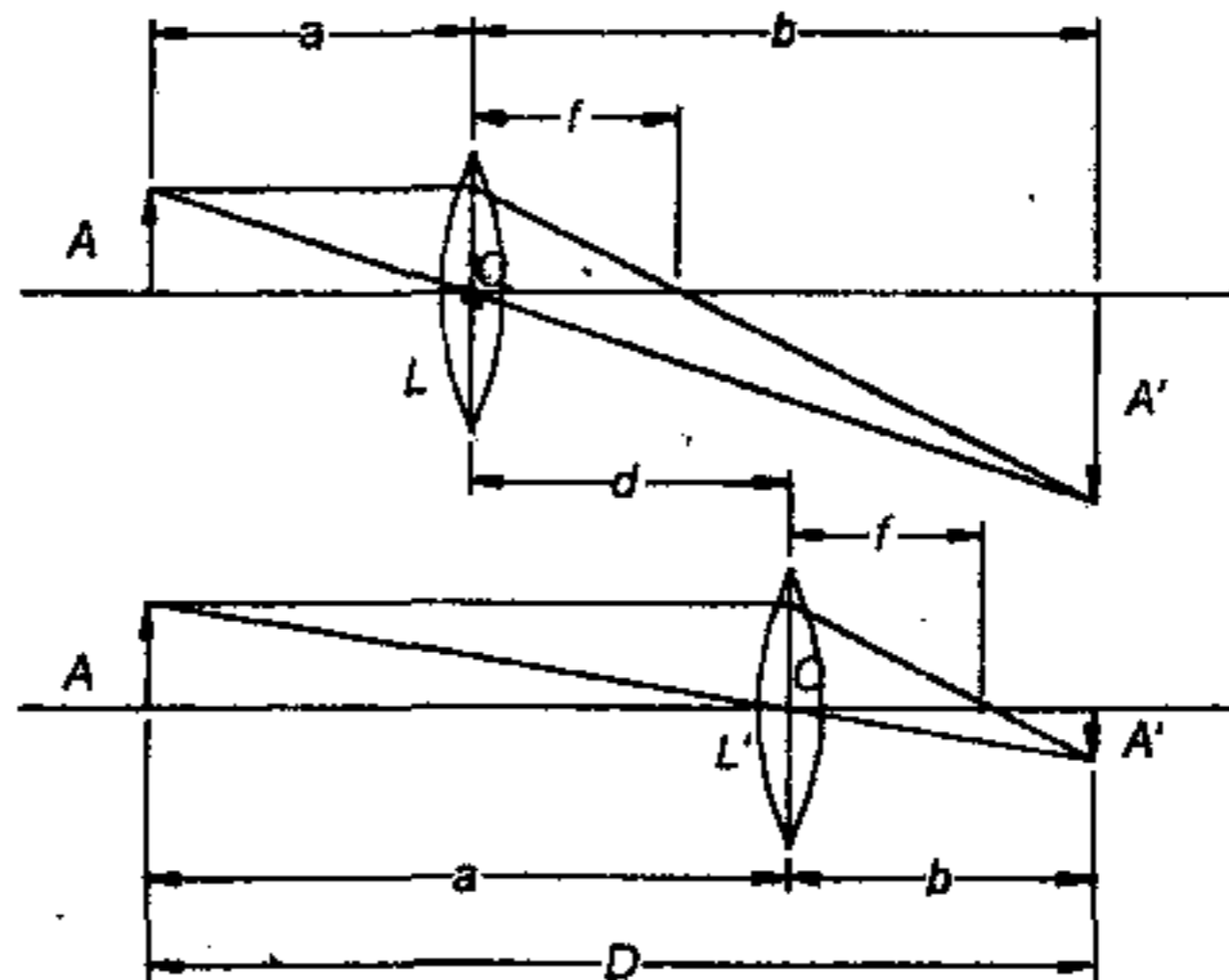


Рис.5. Ход лучей в линзе.

При измерении расстояний a и b возникают ошибки величиной порядка толщины стекла, т.к. точное положение оптического центра линзы внутри нее неизвестно и найти это положение трудно. Можно поступить следующим образом. Из формулы (2.1) видно, что если величины a и b поменять местами, формула не изменится. Практически это означает, что если на месте резкого изображения A' установить сам предмет A , то его изображение получится в том месте, где раньше стоял предмет A . Из сказанного следует вывод, что, если получить резкое обратное и увеличенное изображение предмета A' на экране, измерить a и b , а затем, не трогая предмет и экран, передвинуть линзу L в положение L' так, чтобы расстояние между L' и A равнялось b , то на экране мы снова увидим резкое, обратное, но теперь уменьшенное изображение предмета A' , которое будет находиться от L' как раз на расстоянии a (рис. 5). Таким образом, с помощью линзы можно получить два изображения – увеличенное, находящееся на расстоянии b от центра линзы, и уменьшенное, на расстоянии a , причем величины a и b связаны между собой формулой (2.1).

Обозначим величину, на которую сместился при этом оптический центр линзы O , через d . Это расстояние d можно измерить путем простого перемещения линзы L вдоль главной оптической оси, так как во время этого перемещения оптический центр перемещается на такое же расстояние, как и любая другая точка линзы и ее оправы (например, край основания штатива). Последнее обстоятельство позволяет заменить измерение перемещения оптического центра линзы O измерением перемещения какого-нибудь указателя на штативе этой линзы. Из рис. 5 видно, что

$$D = b + a, \quad d = b - a.$$

Складывая и вычитая эти выражения, получим:

$$b = \frac{D + d}{2}, \quad a = \frac{D - d}{2}.$$

Принимая во внимание формулу (2.1), имеем:

$$f = \frac{D^2 - d^2}{4D} \quad (2.2)$$

Экспериментальная установка

Установка для выполнения этой работы смонтирована на оптической скамье, на которой расположены предмет в виде стрелки, освещенной лампой накаливания, экран и подвижный рейтер (рейтеры) с линзой (линзами). Перед началом измерений центры всех линз следует установить на одной высоте и проследить за тем, чтобы главные оптические оси линз были параллельны направляющим оптической скамьи. При выполнении работы расстояния между деталями оптической системы отсчитываются по линейке, расположенной вдоль оптической скамьи. Отсчет производится по указателям, расположенным на основаниях рейтеров. (Возможны и другие варианты фиксации отсчетов.)

Наводка изображения на резкость производится на глаз. Чтобы уменьшить роль возникающих при этом неточностей, измерения в каждом случае рекомендуется выполнять несколько раз, а результаты – усреднять.

ИЗДАТЕЛЬСТВО
 1950
 16575

Практическая часть

1. Ознакомиться с теоретической частью работы.

2. Ознакомиться с установкой для проведения измерений.

Выполнить задание № 1 "Определение фокусного расстояния тонкой положительной линзы по 1-му методу":

3.1. Измерить расстояния a и b (приблизительно, т.к. положение центра линзы не известно);

3.2. Вычислить f по формуле (2.1).

Для этого необходимо переместить линзу вдоль скамьи до получения четкого изображения предмета на экране. Затем по линейке отсчитать расстояния a и b . При фиксированных положениях предмета и экрана измерения выполнить несколько раз;

3.3. Изменить расстояние между предметом и экраном и вновь повторить измерения. Рекомендуется часть измерений выполнить при увеличенном, а часть – при уменьшенном изображении.

Поскольку точное положение центра оптической линзы не известно и в результате могла войти большая систематическая ошибка, необходимо проверить совместимость полученных результатов. Для этого надо:

- Изобразить результаты на графике, по осям которого отложены $1/a$ и $1/b$. Если результаты опыта могут быть описаны формулой (2.1), то все точки должны лечь на прямую, отсекающую на осях отрезки, равные $1/f$;

- По графику (или непосредственно по результатам опыта) найти среднее значение фокусного расстояния и по разбросу результатов опыта оценить случайную ошибку, возникающую при однократном измерении f указанным способом, и сравнить ее с толщиной линзы;

- Сделать вывод о том, целесообразно ли для исключения случайной ошибки выполнять длинную серию измерений, или можно ограничиться однократным измерением.

4. Выполнить задание № 2 "Определение фокусного расстояния тонкой положительной линзы по 2-му методу".

В описанном выше методе важно, чтобы указатель на рейтере линзы был расположен против ее оптического центра. Применим теперь метод, описанный в теоретической части и свободный от указанного недостатка.

4.1. Установить расстояние между предметом и экраном больше $4f$. При этом всегда найдутся два таких положения линзы, при которых на экране получаются отчетливые изображения предмета.

4.2. Измерить расстояние D между предметом и экраном и расстояние d между двумя положениями линзы, при которых на экране получаются четкие изображения.

Измерения следует производить с линзой, которая применялась в предыдущем опыте.

4.3. Провести опыт при нескольких расстояниях D и при каждом данном D повторить несколько раз.

4.4. Сравнить найденное среднее фокусное расстояние со значением, полученным по первому методу.

5. Выполнить задание № 3 "Определение фокусного расстояния тонкой

отрицательной линзы".

Определение фокусного расстояния тонкой отрицательной линзы затрудняется тем, что изображение предмета получается мнимым (при действительном источнике) и поэтому не может быть непосредственно спроецировано на экран. Эту трудность можно обойти с помощью вспомогательной положительной линзы с оптической силой, большей, чем отрицательная оптическая сила отрицательной линзы.

5.1. Поместить на оптическую скамью вспомогательную положительную линзу, а за ней (по ходу лучей) отрицательную линзу и получить на экране действительное изображение предмета. При этом на отрицательную линзу падает пучок сходящихся лучей, и точка A_1 пересечения этих лучей (рис.6) играет по отношению к отрицательной линзе роль мнимого источника.

5.2. С помощью линейки отметить положение A_2 изображения на экране.

5.3. Убрать ^{отрицательную} положительную линзу и, переместив экран, получить на нем изображение и тем самым определить положение точки A_1 .

5.4. С помощью линейки отметить положение A_1 , в котором будет теперь находиться действительное изображение источника.

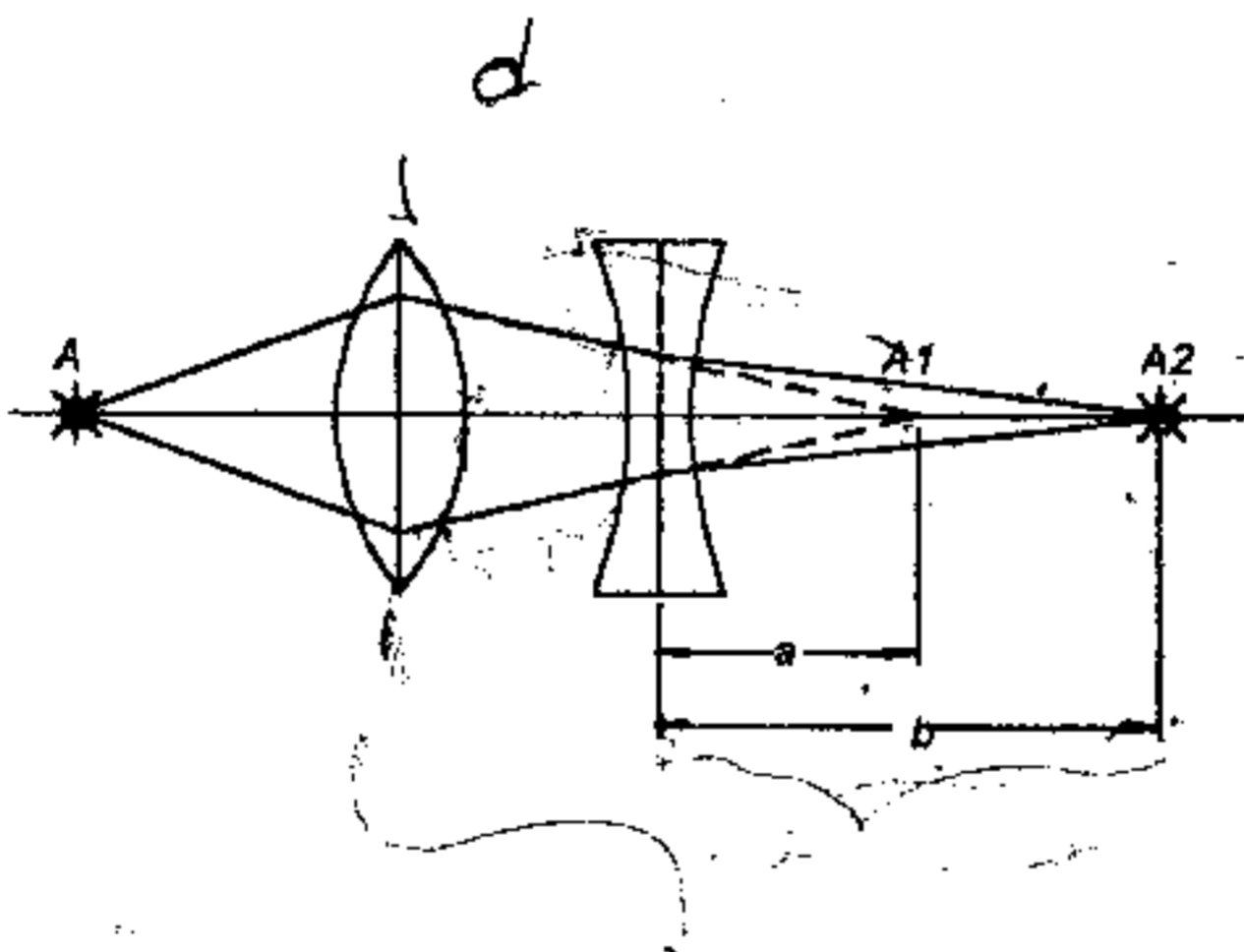


Рис.6 Ход лучей в отрицательной и положительной линзах.

5.5. Измерить расстояния a и b (рис.6) до центра отрицательной линзы.

5.6. С помощью формулы (2.1) вычислить фокусное расстояние отрицательной линзы. При вычислениях величинам a и b надо приписать правильные знаки ($a < 0$, $b > 0$).

5.7. Опыт провести несколько раз при различных значениях a .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение оптического центра, оптической оси, фокальной плоскости и главных фокусов линзы. Начертите ход лучей в линзе.
2. Что такое оптическая сила линзы? В каких единицах измеряется оптическая сила?
3. Постройте ход лучей в оптической системе, изображенной на рис.6. Фокусные расстояния обеих линз и расстояния от линз до источника A считайте известными.
4. Покажите, что если изображение между предметом и экраном превышает $4f$, то изображение на экране может быть получено при двух различных положениях линзы.
5. Можно ли измерить фокусное расстояние отрицательной линзы тем же методом, как в способе 2 для положительной?
6. Как определить по внешнему виду линзы какая она – положительная или отрицательная?

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландсберг Г. С. Оптика. М.: Наука, 1976, 928 с.
2. Гольдин Л. Л., Игошин Ф. Ф., Козел С. М. и др. Лабораторные занятия по физике. Учебное пособие. М.: Наука, 1983, 704 с.

Лабораторная работа № 3

Интерференция света

Цель работы: изучить явление интерференции света; приобрести навыки настройки интерферометра Маха-Цендера; научиться определять угол сходимости лучей; измерить отклонение от плоскопараллельности (клиновидность) стеклянной пластинки.

Принадлежности: оптический стол, 2 диэлектрических полупрозрачных и 2 алюминиевых непрозрачных зеркала в регулируемых оправках на рейтерах, составляющие из себя интерферометр Маха-Цендера, гелий-неоновый лазер, коллиматор, экран, стеклянная пластинка на штативе.

Общие сведения

Из повседневного опыта известно, что при взаимодействии света от двух различных источников (например, от ламп накаливания) результирующая интенсивность света в любой точке пространства, куда свет от них попадает беспрепятственно, равна сумме интенсивностей, создаваемых каждым источником в отдельности. Это происходит тогда, когда источники света некогерентны. Но если источники когерентны, то наблюдается устойчивое пространственное распределение интенсивности света, не подчиняющееся закону простого сложения интенсивностей. Это явление называется интерференцией. В случае интерференции волн от двух когерентных источников результирующая интенсивность световых колебаний в точке наблюдения определяется по закону:

$$J = J_1 + J_2 + 2 (J_1 J_2)^{1/2} \cos \Delta\varphi,$$

где J_1 и J_2 — интенсивности излучения 1 и 2 источников, $\Delta\varphi$ — разность фаз колебаний в точке наблюдения.

Таким образом, результат интерференции определяется разностью фаз интерферирующих волн, зависящей от разности начальных фаз и оптической разности хода волн в точке наблюдения.

Рассмотрим интерференцию плоских волн (рис.7).

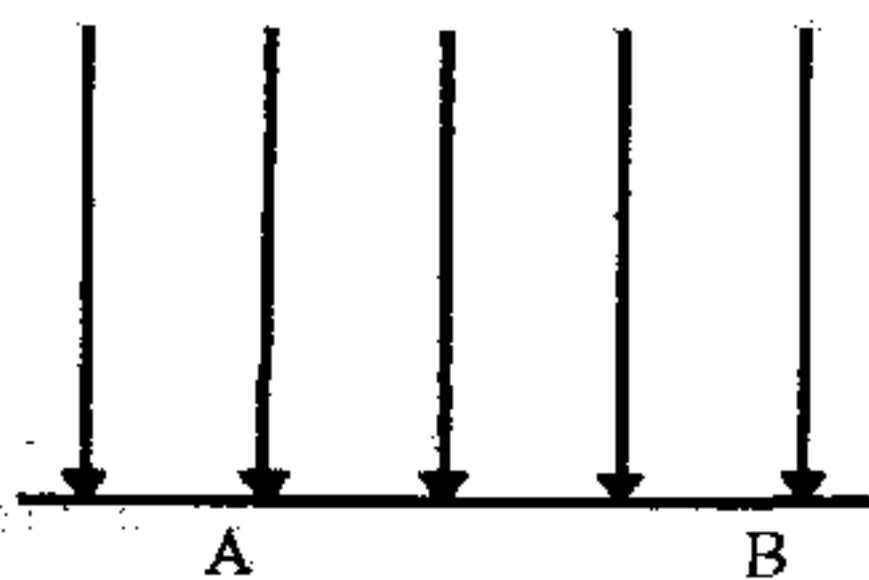


рис.7а

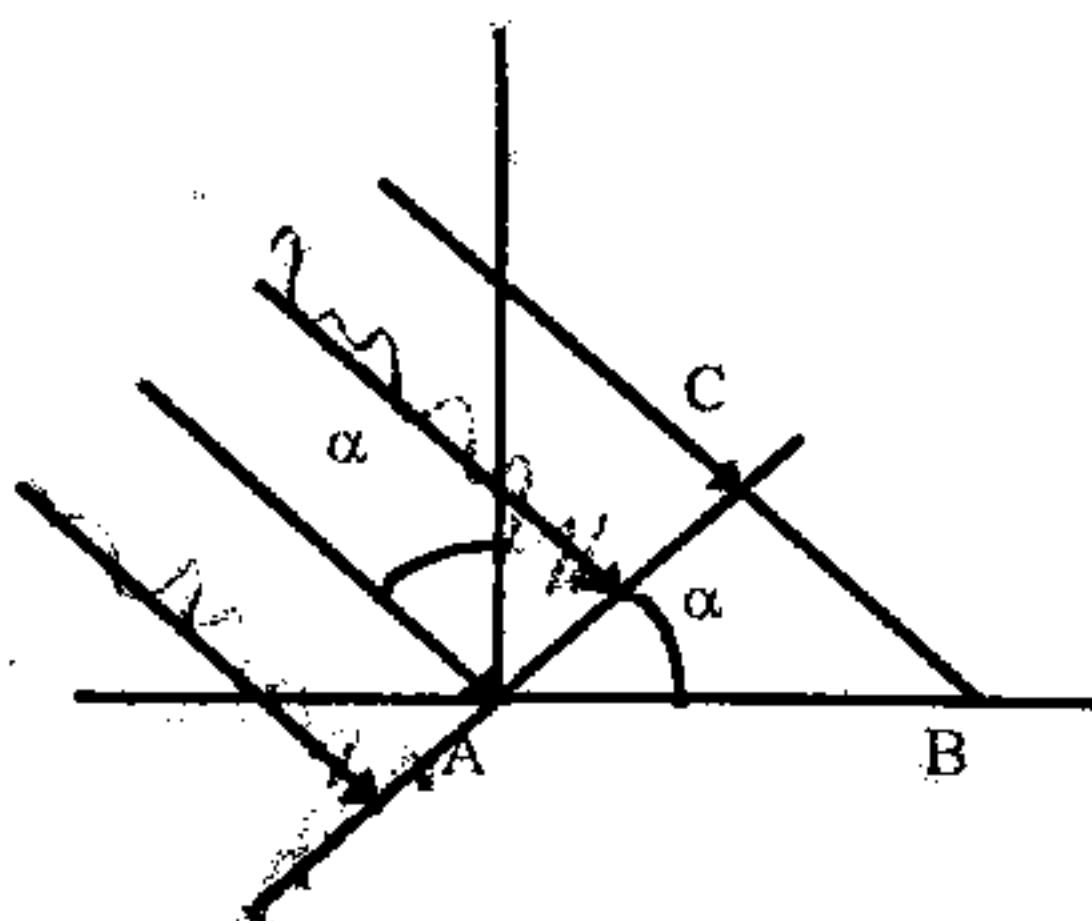


рис.7б

Рис. 7. Интерференция плоских волн.

Пусть интерференционная картина наблюдается на экране, перпендикулярном направлению первой волны. Во всех точках плоскости экрана колебания, создаваемые первой волной, будут происходить синфазно (в одинаковой фазе) (рис.7а). Для второй волны, падающей на экран под углом α , этого уже наблюдаться не будет, т.к. разные участки фронта волны будут достигать экрана в разное время (на самом деле угол α очень мал). В различных точках прямой, лежащей в плоскости падения, на экране для двух рассматриваемых волн будет существовать разность хода, приводящая к разности фаз, а именно: в точку В фронт второй волны приходит позднее чем в точку А (рис.7б). Разность хода волны между точками А и В равна:

$$CB = AB \sin \alpha$$

Разность фаз колебаний:

$$\Delta\varphi = k CB = 2\pi AB \sin \alpha / \lambda,$$

где k — волновой вектор, λ — длина волны излучения. Следовательно, если предположить, что первая и вторая волны колеблются синфазно в точке А (т.е. создадут там максимальную интенсивность колебаний), то в точке В между волнами может существовать ненулевая разность фаз и интенсивность колебаний здесь может быть не максимальной. Только если разность хода $CB = N\lambda$, ($N = 1, 2, \dots$), в точке В будет все же наблюдаться максимум интенсивности.

Разность фаз колебаний первой и второй волн в любой точке пространства постоянна во времени и зависит только от положения этой точки. Поэтому результирующая интенсивность зависит от положения точки наблюдения, и на экране будет наблюдаться система темных и светлых полос, перпендикулярных плоскости падения. Расстояние между полосами:

$$\Delta = \lambda / \sin \alpha. \quad (3.1)$$

Для устойчивости интерференционной картины необходимо постоянство во времени разности фаз колебаний. Это условие практически невозможно выполнить для независимых источников излучения, т. к. потребовалось бы согласовать скачки частоты и фазы, происходящие при работе всех существующих источников излучения.

Например, для серийных лазеров время, в течение которого начальная фаза не изменяется, составляет менее 10^{-6} с. Это означает, что начальная фаза колебаний φ_0

изменяется более 10^6 раз за 1 с. случайным образом. При каждом скачке фазы интерференционная картина смещается. Это приводит к тому, что глаз не замечает интерференции. Поэтому в приборах, использующих явление интерференции, применяют один источник света, разделяя его излучение с помощью зеркал или другим способом. Начальные фазы в полученных пучках изменяются хаотически, но частота и разность начальных фаз всегда остаются постоянными. Таким образом, эти лучи когерентны. Для наблюдения интерференции лучей от источника, имеющего конечный размер, необходимо, чтобы интерференционные максимумы, создаваемые излучением какой-либо точки источника, не перекрывались с минимумами от другой точки (пространственная когерентность). Это условие не всегда выполняется в случае достаточно протяженных источников. Лазерное излучение обладает почти идеальной пространственной когерентностью, т. к. все точки активной среды лазера излучают согласованно. Поэтому проще всего получать интерференционные картины с помощью лазера.

Явление интерференции света используется в измерительных приборах, называемых интерферометрами. Один из них — интерферометр Маха-Цендера. Его оптическая схема приведена на рис. 8.

Экспериментальная установка

В данной работе используется интерферометр Маха-Цендера, образованный парой полупрозрачных диэлектрических зеркал и парой 100% зеркал с алюминиевым напылением (рис. 8).

Лазерный луч разделяется полупрозрачным зеркалом 3 на два луча А и В, которые после отражения от зеркал 1 и 4 попадают на полупрозрачное зеркало 2 и становятся параллельными.

В случае идеальной параллельности ширина интерференционных полос на экране будет бесконечной. В силу неидеальной плоскостности поверхности зеркал на экране видны очень широкие интерференционные полосы специфической формы, соответствующей форме прогиба поверхности зеркал. Появление в одном из лучей оптической дополнительной неоднородности приводит к появлению на экране густо расположенных интерференционных полос.

Источником излучения в данной работе служит гелий – неоновый лазер ЛГ-77. Диаметр лазерного пучка невелик, что затрудняет наблюдение интерференционной картины и проведение измерений. Для увеличения этого диаметра используется коллиматор (телескоп). Интерференционная картина наблюдается на экране с миллиметровой сеткой. Все оптические элементы закрепляются в рейтерах, установленных на рельсах.

Если в луч А поместить стеклянную пластинку (оптический клин) с углом между поверхностями β , луч А отклонится на угол

$$\alpha = \beta \cdot (n-1), \quad (3.2)$$

где n – показатель преломления стекла для данной длины волны. На экране появится упомянутая выше система густо расположенных интерференционных полос, по расстоянию между которыми можно вычислить угол схождения лучей, а затем и угол между поверхностями пластинки.

Внимание!

Не прикасаться руками к поверхности зеркал и линз!

Практическая часть

1. Установить оптические элементы, за исключением коллиматора, оптического клина и экрана, так, как указано на рис.8.
2. Вращением окрашенных в серый цвет винтов на оправках зеркал (**ДРУГИЕ ВИНТЫ НЕ КРУТИТЬ!**) настроить интерферометр. *Добрый совет — при выполнении настройки точно следуйте инструкции. Отклонение от нее, как правило, не приводит к положительному результату.*
 - а) перекрыть луч А;
 - б) подстраивая зеркало 1, завести луч В в середину зеркала 2;
 - в) открыть луч А;
 - г) подстраивая зеркало 4, завести луч А в середину зеркала 2;
 - д) тщательно совместить на зеркале 2 лучи А и В;
 - е) установить экран. Подстраивая зеркало 2, совместить лучи А и В на экране. Полезно при этом следить за совмещением лучей как в ближней зоне (вблизи интерферометра), так и в дальней зоне (на удаленной стене). При тщательном выполнении этого пункта на экране появится интерференционная картина.
 - ж) установить в соответствии с рис.8 и настроить коллиматор; подстройкой одного из зеркал получить максимально возможную ширину интерференционных полос.

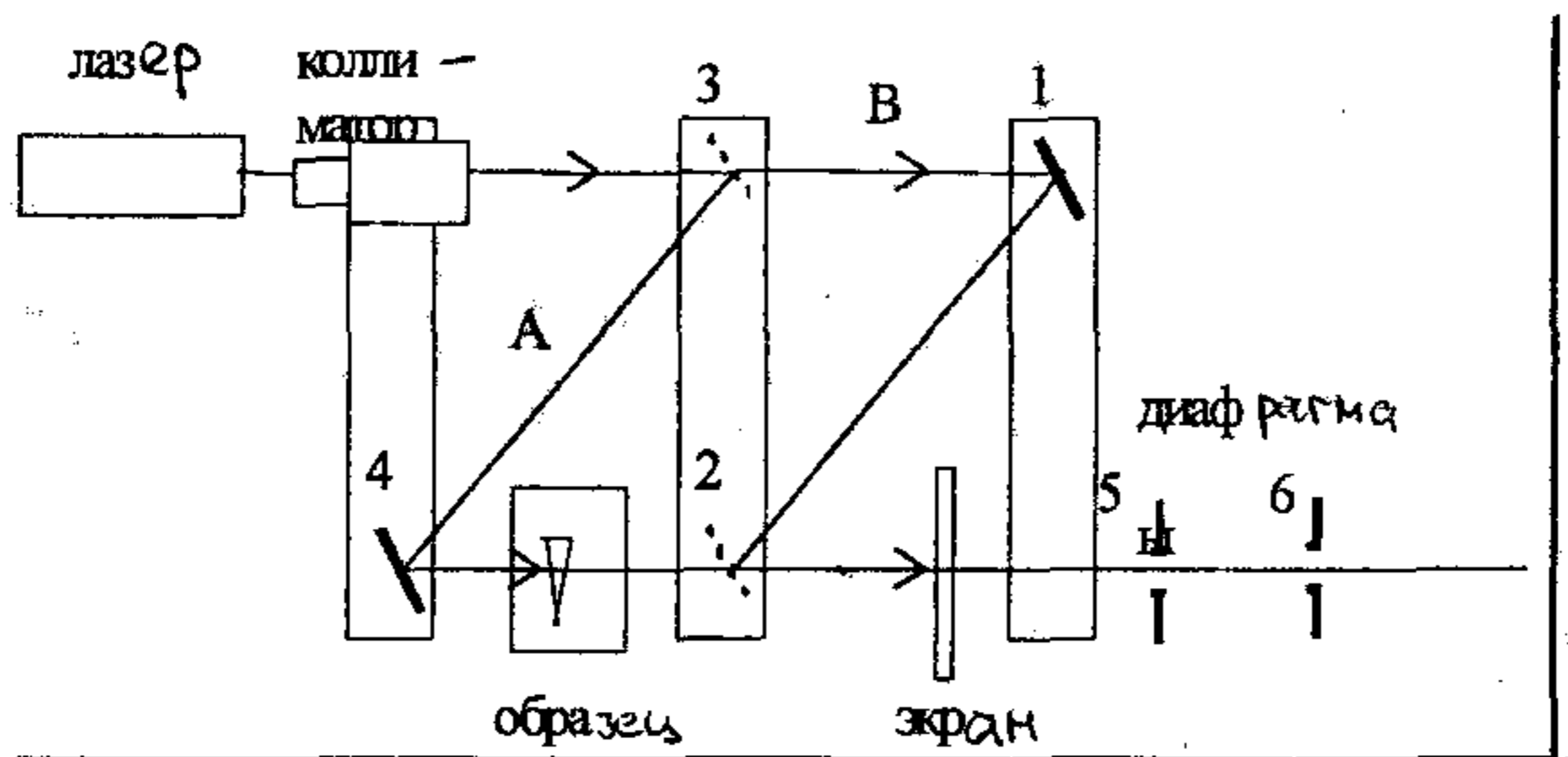


рис. 8

3. В луч А поместить стеклянную пластинку.
4. Измерить период интерференционных полос на экране.
5. Повернуть рейтер со стеклянной пластинкой вокруг вертикальной оси. При этом лазерный луч будет отклоняться пластинкой в противоположную сторону. Повторно измерить период полос на экране.
6. Измерения провести несколько раз. Вычислить средний период полос и оценить погрешность измерений.

7. По формуле (3.1) вычислить угол схождения лучей на экране.
8. Вычислить угол клина стеклянной пластинки, если показатель преломления стекла $n=1,52$ для длины волны лазера.
9. Оценить погрешность результата.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется волной? Запишите уравнение бегущей волны.
2. Что такое интерференция?
3. Каков физический смысл фазы и амплитуды колебаний световых волн?
4. Как доказать, что полосы на экране — результат интерференции?
5. Почему полос нет, когда интерферометр плохо настроен (при этом две волны все равно остаются когерентными)?
6. Почему интерференция исчезает при вибрации стола с интерферометром?
7. Влияет ли поляризация световых волн на вид интерференционной картины?
8. Попробуйте получить формулы (1) и (2).
9. Что следует изменить в вычислениях угла клина пластинки при использовании лазера с другой частотой излучения?

Литература

1. Сивухин Д. В. Оптика. М.: Наука, 1985.
2. Ландсберг Г. С. Оптика. М.: Наука, 1976, 928 с.

$$\chi = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{d} \frac{1}{\sin \alpha}$$

Лабораторная работа № 4

Изучение дифракции света

Цель работы: познакомиться с явлением дифракции света; изучить дифракцию на щели; измерить длину волны лазерного излучения; изучить дифракцию света на периодической структуре и измерить этот период с помощью явления дифракции; изучить явление дифракции света на круглом отверстии и на круглом препятствии.

Принадлежности: оптический стол; лазер; отклоняющие призмы в держателях на рейтерах; регулируемая щель; экран; периодическая структура (дифракционная решетка); диафрагма (круглое отверстие в непрозрачной преграде); круглое препятствие (маленький шарик на проволочке); держатели, рейтеры.

Общие сведения

Дифракция света

Явление огибания волнами препятствий называется **дифракцией**. Для света, вследствие его волновой природы, также наблюдается дифракция, которая проявляется в отклонениях от законов геометрической оптики при распространении света.

Дифракция может быть объяснена на основе принципа Гюйгенса-Френеля. Пусть на пути световой волны расположен экран с отверстием. Каждую точку фронта световой волны внутри отверстия можно рассматривать как источник вторичных волн. Эти источники когерентны, так как их колебания вызываются одной и той же падающей волной и их фазы строго согласованы между собой. Поэтому вторичные волны, исходящие от таких источников, будут интерферировать между собой. Вычислив результат их интерференции, можно найти амплитуду колебаний, а затем и интенсивность света в любой точке пространства, куда доходит световая волна от отверстия.

Явление дифракции принято классифицировать в зависимости от расстояний от источника и точки наблюдения (экрана) до препятствия, поставленного на пути распространения света. Если эти расстояния велики, то дифракция называется дифракцией в параллельных лучах или дифракцией Фраунгофера. В противном случае говорят о дифракции Френеля.

Дифракция Френеля

Вид дифракционной картины можно объяснить с помощью мысленного разбиения волнового фронта в районе препятствия на зоны — зоны Френеля. Они выбираются так, чтобы расстояние от каждой следующей зоны до точки наблюдения было на половину длины волны больше, чем от предыдущей. Фазы вторичных волн,

посылаемых точками каждой двух соседних зон, противоположны в точке наблюдения, поэтому суммарный вклад в интенсивность двух полностью открытых зон близок или равен нулю (в зависимости от формы отверстия). В результате этого при освещении плоской монохроматической волной, например, небольшого круглого отверстия АВ в непрозрачном экране (рис.9) на экране Э наблюдается система светлых и темных интерференционных колец с общим центром в точке О, лежащей напротив центра.

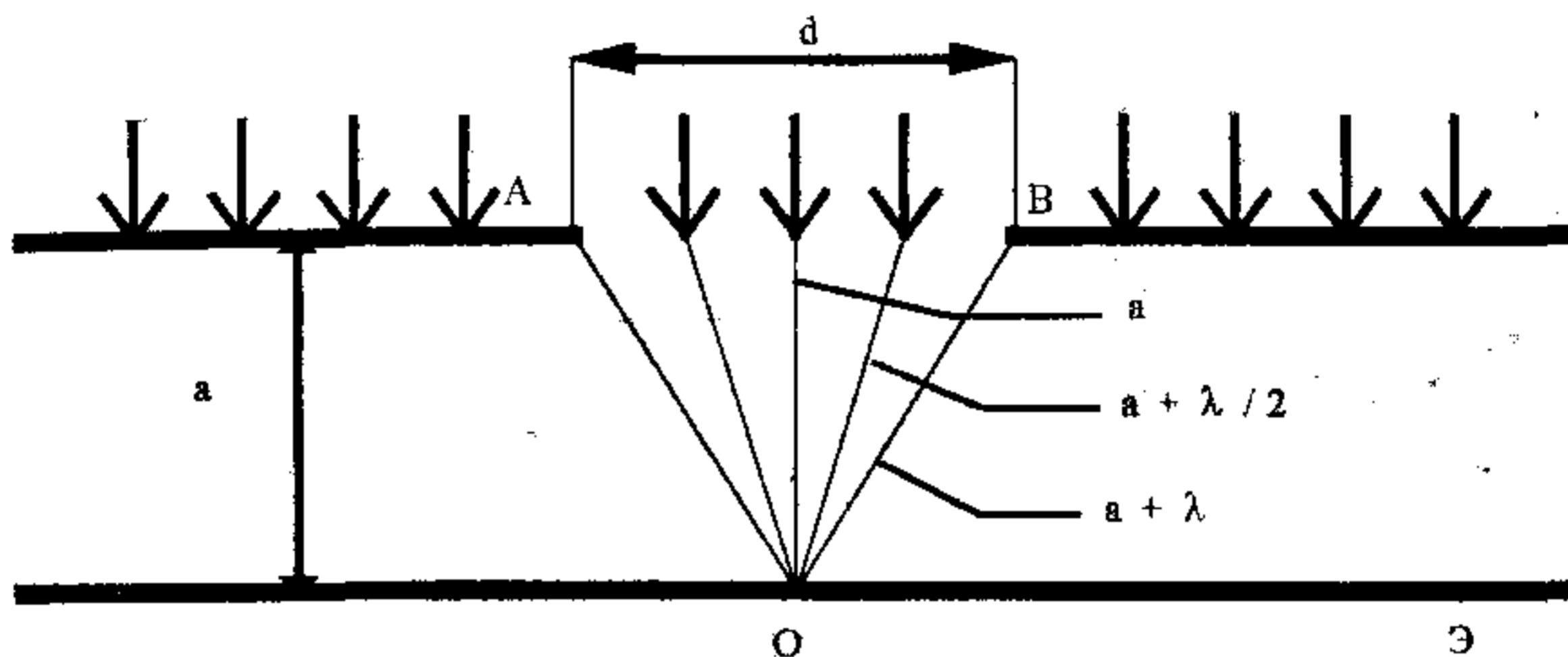


Рис.9. Дифракция на отверстии.

Зоны Френеля для точки О — это система колец с общим центром, совпадающим с центром отверстия. Если для точки О в отверстии укладывается четное число $2k$ ($k = 1, 2, \dots$) зон Френеля, то в ней находится темное пятно; интенсивность света в точке О меньше, чем при отсутствии экрана. Если число зон нечетное, то в точке О находится светлое пятно.

Для плоского волнового фронта радиус k -ой зоны Френеля вычисляется по формуле:

$$R_k = (k\lambda a)^{1/2}, \quad (4.1)$$

где k — порядковый номер зоны Френеля, λ — длина волны, a — расстояние между экранами.

Для оценки интенсивности света в другой точке экрана надо выполнить аналогичный анализ. В этом случае также зоны Френеля будут представлять собой концентрические кольца, только их центр уже будет не в центре отверстия, а несколько смещенным, располагаясь напротив рассматриваемой точки. Интенсивность света будет определяться количеством открытых (полностью или частично) зон Френеля.

Число зон Френеля, укладывающихся в отверстии, и контрастность интерференционной картины зависят от отношения диаметра отверстия d к расстоянию a между экранами АВ и Э. По мере увеличения d/a амплитуда света в центре экрана Э приближается к $1/2$ (I — амплитуда, соответствующая первой зоне), и контрастность интерференционных колец уменьшается.

В случае дифракции Френеля на круглом непрозрачном препятствии интерференционная картина на экране состоит из концентрических темных и светлых

колец с центром в точке O , где находится интерференционный максимум (пятно Пуассона). По мере увеличения отношения диаметра диска к расстоянию от диска до экрана яркость пятна Пуассона постепенно уменьшается, следующее за ним темное кольцо расширяется, образуя область тени за диском.

Дифракция Фраунгофера

Рассмотрим данный вид дифракции на примере дифракции на щели.

Если точка наблюдения расположена на таком расстоянии от щели, что на щели укладывается лишь небольшая часть первой зоны Френеля, т.е. ширина первой зоны Френеля значительно больше ширины щели, то говорят о дифракции Фраунгофера. В этом случае лучи, идущие от противоположных краев щели и приходящие на экран в одну точку, можно считать почти параллельными и добавка δ к разности хода $d \sin \varphi$, обусловленная именно непараллельностью лучей, идущих от этих краев, много меньше длины волны (см. рис. 10).

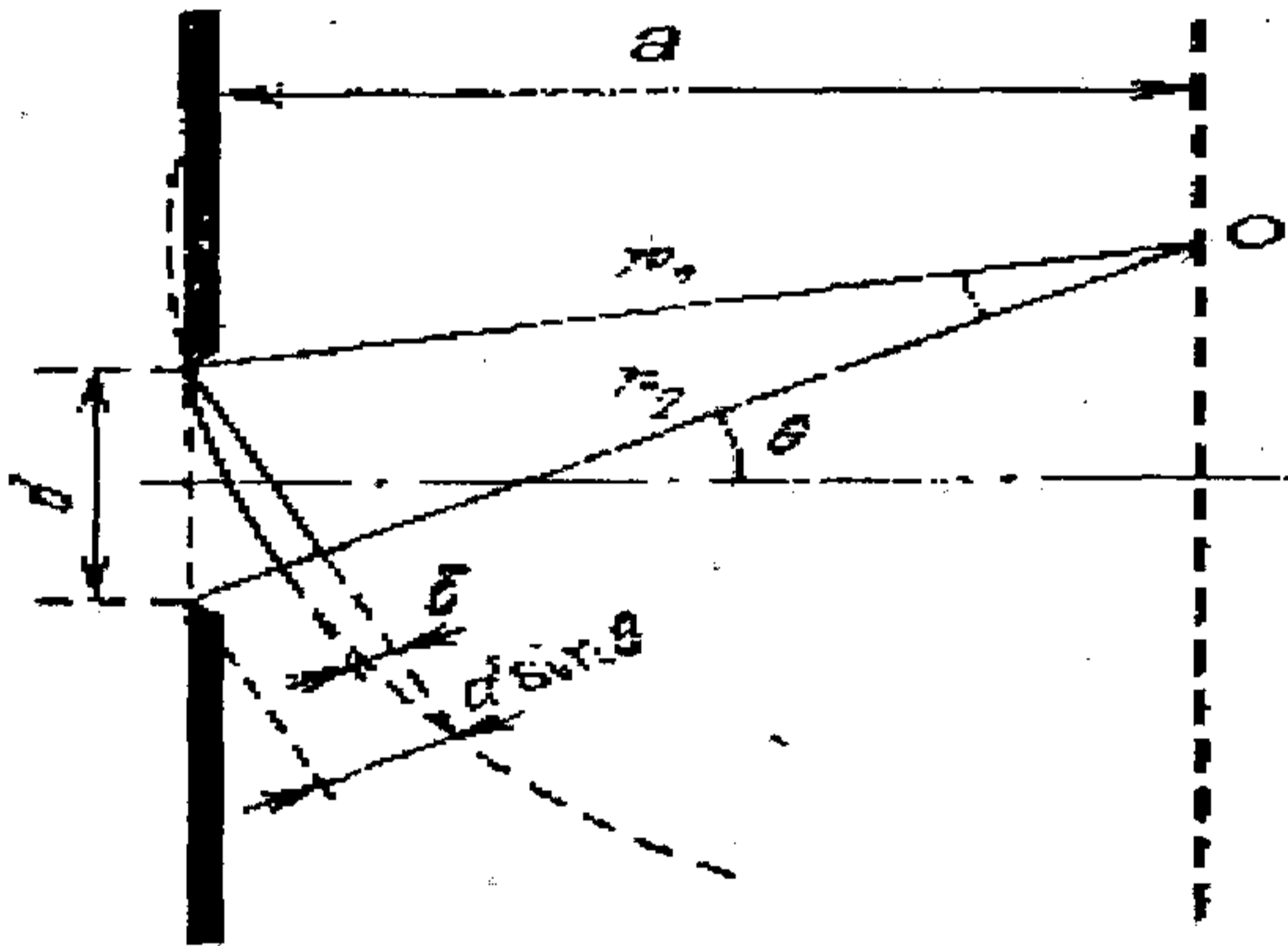


Рис.10. Дифракция на щели.

Для нахождения направления на первый минимум разобьем щель на 2 равные по ширине зоны (см. рис.11).

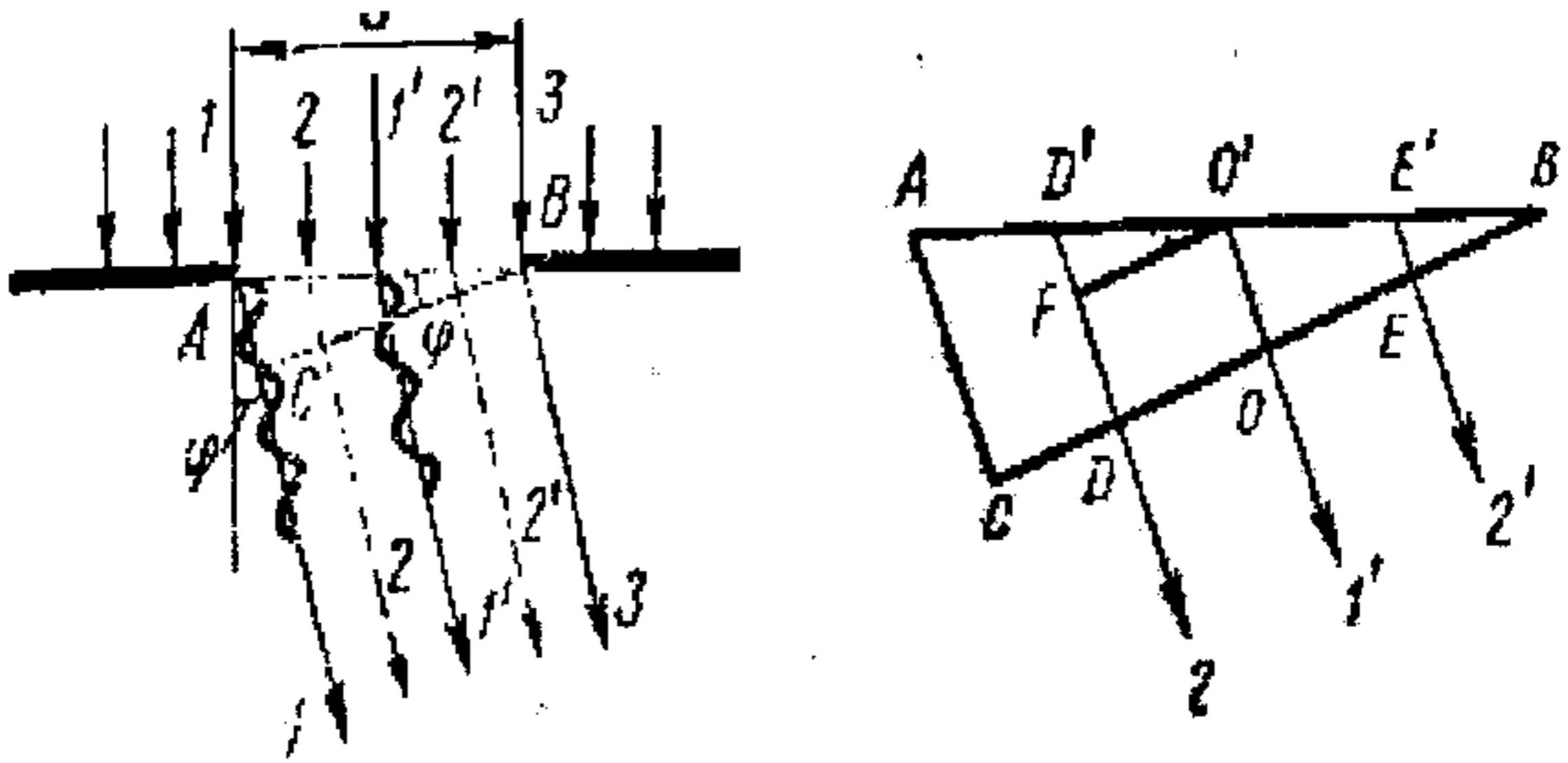


Рис. 11. Дифракция в параллельных лучах.

Рассмотрим 2 точки на правой и левой половинах щели, расстояние между которыми равно $d/2$ (здесь d — снова ширина щели). Если в каком-то направлении φ для волн, исходящих из этих точек, разность хода равна $\lambda/2$, то в этом направлении волны погасят друг друга. Другими словами, в направлении φ вторичные волны при интерференции с волнами другой половины щели дадут минимум интенсивности. Это условие выполняется, если $d/2 \sin \varphi = \lambda/2$, или $d \sin \varphi = \lambda$.

Дифракция на решетке

Система из большого числа N одинаковых по ширине и параллельных друг другу щелей на экране, разделенных также одинаковыми по ширине непрозрачными промежутками, является простейшей дифракционной решеткой. Величина $d = a + b$, где b — ширина непрозрачного промежутка, a — ширина щели, называется периодом дифракционной решетки.

При расчете дифракционной картины на экране необходимо учитывать интерференцию вторичных волн как от разных участков одной щели, так и от разных щелей решетки (рис.12).

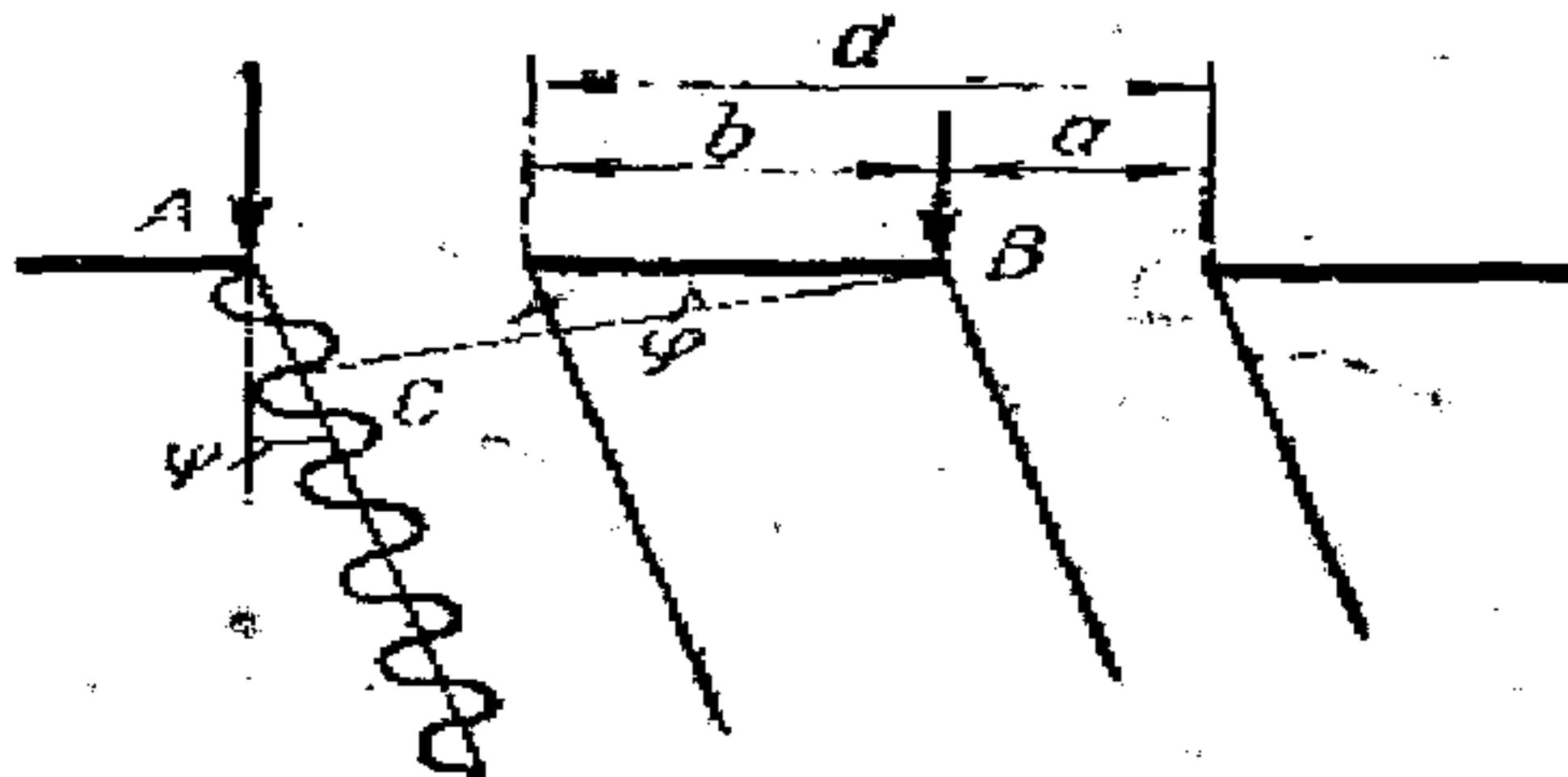


Рис.12. Дифракция на решетке.

Максимум интенсивности соответствует углам дифракции, при которых разность хода для вторичных волн, исходящих из точек, одинаково удаленных, например, от левых краев в плоскости щелей, равна целому числу длин волн:

$$d \sin \varphi_m = \pm m \lambda, \quad (4.2)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$ и называется порядком главного максимума.

Таким образом, при падении плоской монохроматической волны на дифракционную решетку дифрагированные волны эффективно распространяются только под некоторыми углами φ_m , которые можно определить по формуле (4.2).

Практическая часть

1. Ознакомиться с теоретической частью работы.
2. Выполнить задание № 1 "Экспериментальное определение длины волны лазерного излучения по дифракции Фраунгофера на щели". Для этого:
 - 2.1. Собрать оптическую схему согласно рис.13. Расстояние от щели до экрана должно быть около 0,5 м.

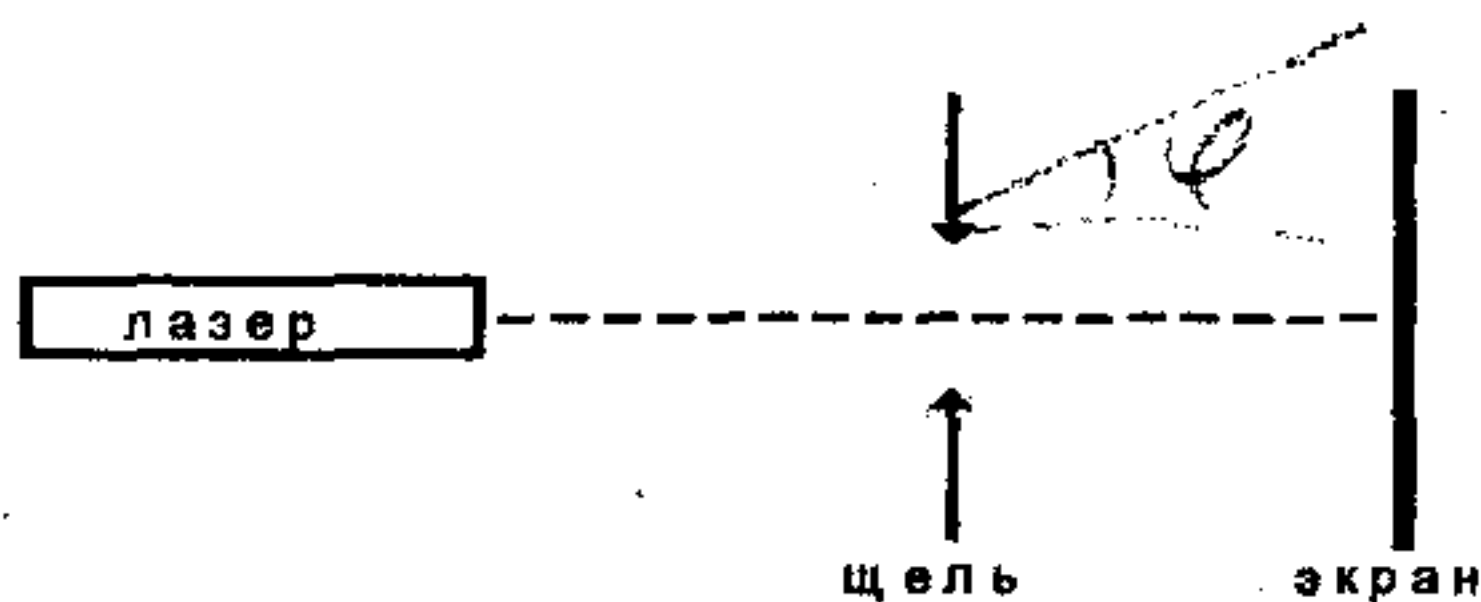


Рис.13. Оптическая схема установки для определения длины волны лазерного излучения.

2.2. Вращая микрометрический винт механизма щели против часовой стрелки, полностью закрыть щель. Затем, медленно вращая винт по часовой стрелке, зафиксировать показания на барабане микрометра в тот момент, когда за щелью появится свет. Если вы проскочили это положение, то измерение надо начинать сначала. Для уменьшения погрешности необходимо провести несколько измерений. Вычислить среднее из показаний на барабане микрометрического винта, при которых начинает открываться щель. Это будет началом отсчета для измерения ширины щели.

2.3. Приоткрыв щель, получить на экране четкую дифракционную картину.

2.4. Измерить расстояние от щели до экрана.

2.5. Измерить расстояние между первыми дифракционными минимумами (между серединами двух темных полосок по обе стороны от центральной освещенной полоски) для 7 значений ширины щели. Желательно, чтобы максимальное и минимальное значения отличались на порядок. Использовать такие значения ширины щели, чтобы, с одной стороны, погрешность измерения расстояний на экране была невелика (чем уже щель, тем больше расстояние и меньше относительная погрешность), а с другой, погрешность определения размера щели также не была большой (чем шире щель, тем меньше относительная погрешность). **ВНИМАНИЕ!** При измерениях вращение винта должно производиться только по часовой стрелке. Это необходимо для устранения ошибок, связанных с существованием зазоров и люфтов в механических деталях щели.

2.6. Построить график зависимости $\operatorname{tg} \varphi$ от $1/N$, где N — ширина щели, φ — угол, характеризующий направление на первый дифракционный минимум. Величины погрешностей в каждой точке изобразить крестиками, ширина и высота крестика должны соответствовать погрешностям определения $1/N$ и $\operatorname{tg} \varphi$ в этой точке.

2.7. Через точки на графике провести наилучшую прямую. Тангенс угла наклона этой прямой приблизительно равен длине волны излучения λ .

2.8. Оценить погрешность измерения. Для этого через полученные крестики провести прямые с несколько иными углами наклона, еще укладывающимися в размеры крестиков. Разбежка в тангенсах углов наклона будет грубой оценкой погрешности измерения длины волны.

3. Выполнить задание № 2 "Определение периода дифракционной решетки". Для этого:

3.1. Собрать схему согласно рис. 14. Решетку и экран установить перпендикулярно лазерному лучу. Найти яркий отраженный луч, соответствующий нулевому максимуму. Он должен попадать примерно на центр отверстия в экране, а дифракционные максимумы положительных и отрицательных порядков должны располагаться симметрично относительно центрального нулевого максимума. Определить количество отраженных лучей.

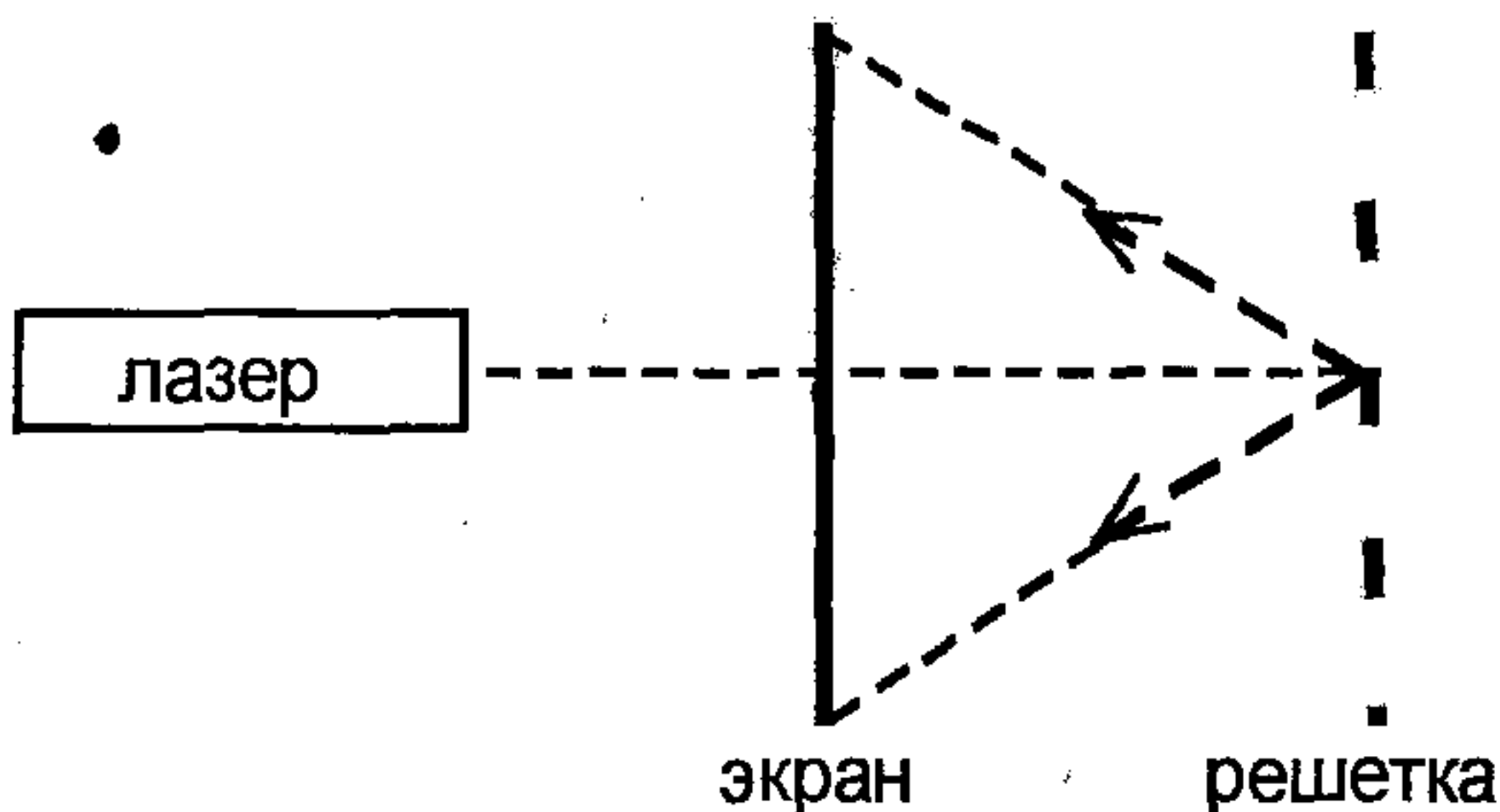


Рис.14. Оптическая схема установки для определения периода дифракционной решетки.

3.2. Провести измерения, необходимые для вычисления синусов углов отражения лучей от дифракционной решетки. Для этого измерить расстояние от решетки до экрана и расстояние от центров максимумов до середины нулевого максимума.

3.3. Вычислить период решетки.

3.4. Оцените погрешность.

4. Выполнить задание № "Изучение дифракции Френеля". Для этого:

4.1. Собрать схему согласно рис. 15.

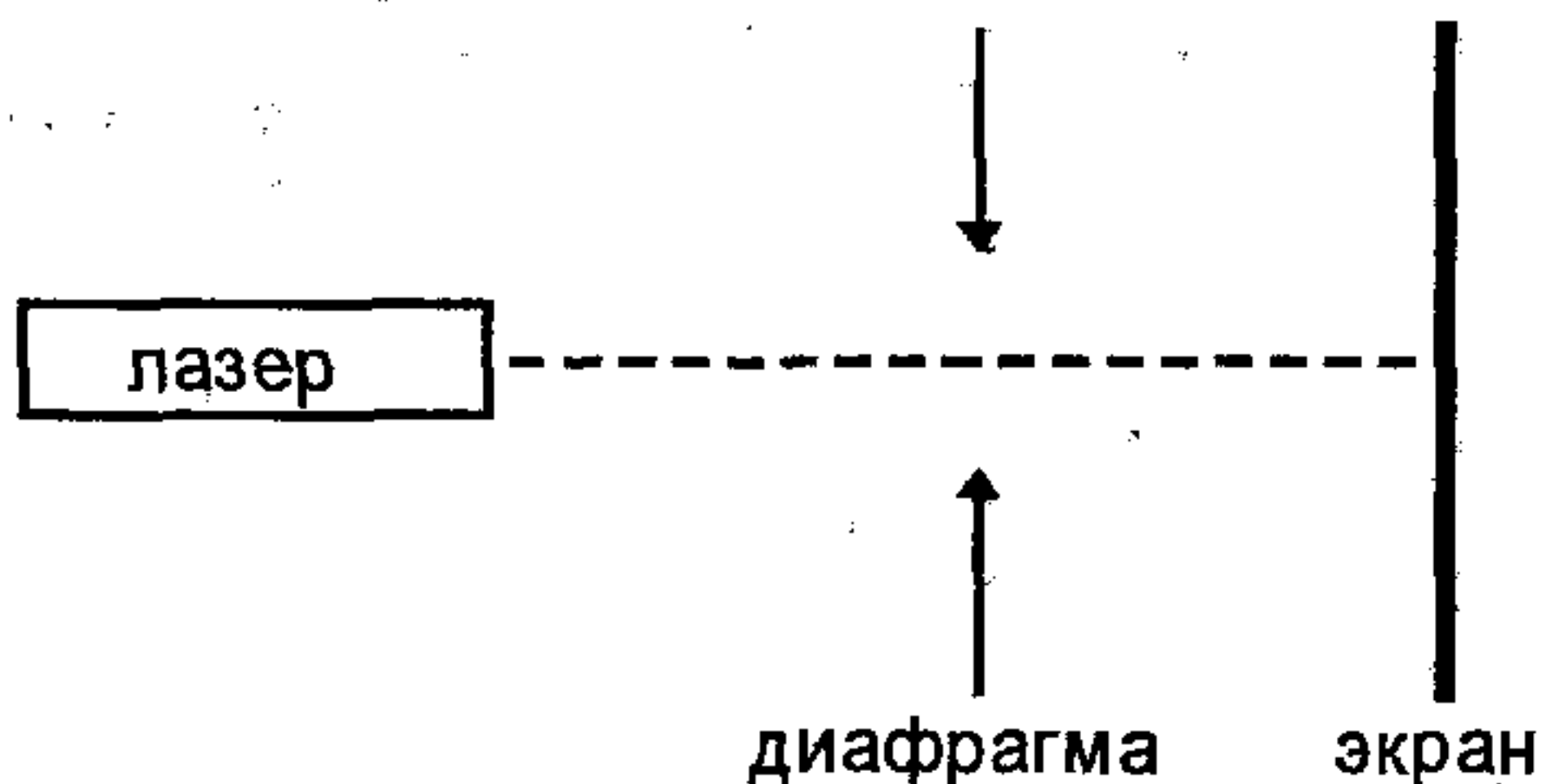


Рис.15. Оптическая схема установки для изучения дифракции Френеля.

4.2. По формуле (4.1) рассчитать, на каком расстоянии от диафрагмы в середине

дифракционной картины будет наблюдаться темное пятно, если диаметр диафрагмы 1,4 мм и открыто две зоны Френеля.

4.3. Экспериментально найти это положение экрана и измерить расстояние между экраном и диафрагмой несколько раз. Определить погрешность измерения.

4.4. Вместо диафрагмы установить рейтер с небольшим диском или шариком ($d=0,9$ мм). Перемещая экран, получите светлое пятно в середине тени от диска. Исследовать, на каких расстояниях до экрана это пятно не заметно.

Контрольные вопросы

1. Что такое волновой фронт?
2. Влияет ли поляризация излучения на вид дифракционной картины?
3. Обязательно ли для наблюдения дифракции, чтобы размер препятствия был сравним с длиной волны?
4. Изменится ли формула для вычисления размеров зон Френеля при наблюдении дифракции света в воде?
5. Можно ли наблюдать дифракцию на отверстии при освещении его белым светом?
6. Почему при наблюдении в микроскоп объектов с размерами, гораздо меньшими, чем ширина щели в обычных опытах, дифракция не заметна?
7. Диаметры объективов телескопов стараются сделать, как можно большими, чтобы уменьшить дифракцию и за счет этого увеличить разрешающую способность. Почему разрешающая способность телескопа зависит чаще всего только от диаметра объектива, а не от размера окуляра, значительно меньшего, чем объектив?

Литература

1. Сивухин Д. В. Оптика. М.: Наука, 1985.
2. Ландсберг Г. С. Оптика. М.: Наука, 1976, 928 с.
3. Гольдин Л. Л., Игошин Ф. Ф., Козел С. М и др. Лабораторные занятия по физике. Учебное пособие. М. – Л.: Наука, 1983, 704 с.

Содержание

Лабораторная работа № 1 Молекулярная рефракция	3
Лабораторная работа № 2 Определение фокусного расстояния	16
Лабораторная работа № 3 Интерференция света	21
Лабораторная работа № 4 Изучение дифракции света	26

Учебное издание

НАУМЕНКО Виктор Иванович,
СИЛЕНКОВ Михаил Анатольевич,
ФЕДОРЕНЧИК Елена Викторовна
БУТЕНКО Сергей Сергеевич,
ЛЫСЕНКО Ольга Григорьевна

Методические указания к лабораторным работам по курсу оптики

Редакторы Г. В. Тихомирова, А. Д. Новиков

Сдано в набор 27/XI 2000 г. Подписано в печать XI 2000 г.
Формат . Бумага офсетная №1. Гарнитура Тип Таймс.
Усл.- печ. л. Тираж 110 экз. Заказ