



Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ФИЗИКА

Часть 3 ОПТИКА

Учебно-методическое пособие
по дисциплине «Физика»
к выполнению лабораторных работ
для студентов
всех специальностей и направлений
очного и заочного обучения

Екатеринбург
2024

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО

Методической комиссией
Факультета геологии и геофизики

13 июня 2024 г.

Председатель комиссии



К. В. Вандышева

ФИЗИКА

Часть 3 ОПТИКА

Учебно-методическое пособие
по дисциплине «Физика»
к выполнению лабораторных работ
для студентов
всех специальностей и направлений
очного и заочного обучения

Рецензент: *П. Е. Панфилов*, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики конденсированного состояния и наноразмерных систем ИЕНиМ УрФУ, г. Екатеринбург

Учебно-методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры физики 30.05.2024 г. (протокол № 19) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Зайцев Д. В., Морилов В. В., Куклина А. А., Сафонов А. Н.

317 **ФИЗИКА. Часть 3. ОПТИКА:** учебно-методическое пособие по дисциплине «Физика» к выполнению лабораторных работ / Д. В. Зайцев, В. В. Морилов, А. А. Куклина, А. Н. Сафонов; Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2024. – 68 с.

Учебно-методическое пособие содержит краткие теоретические сведения и практические рекомендации, необходимые для выполнения лабораторных работ, а также описание приборов и лабораторных стендов.

Предназначено для студентов всех специальностей и направлений очного и заочного обучения.

© Зайцев Д. В., Морилов В. В.,
Куклина А. А., Сафонов А. Н., 2024
© Уральский государственный
горный университет, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Лабораторная работа № 1. Определение показателя преломления жидкостей при помощи рефрактометра.....	5
Лабораторная работа № 2. Измерение радиуса кривизны линзы цифровым микроскопом при помощи колец Ньютона.....	12
Лабораторная работа № 3. Определение оптических характеристик собирающей и рассеивающей линз.....	21
Лабораторная работа № 4. Определение процентного содержания сахара при помощи полутеневого поляриметра.....	31
Лабораторная работа № 5. Изучение дифракции лазерного излучения..	43
Лабораторная работа № 6. Изучение явления интерференции света в опыте Юнга.....	55
Лабораторная работа № 7. Проверка закона Малюса.....	61
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	67

ВВЕДЕНИЕ

Оптика изучает свойства света и взаимодействие его с веществом. Изучение оптических явлений началось во времена глубокой древности и отражено в трудах Аристотеля, Евклида, Платона, Птолемея, Снеллиуса. К концу XVII века сформировались две различные теории о природе света: корпускулярная теория Ньютона и волновая теория Гюйгенса. Обе теории правильно объясняли законы отражения и преломления света и длительное время существовали параллельно. Позднее были открыты такие явления, как интерференция, дифракция и поляризация света. Эти явления можно было объяснить только с позиций волновой теории. Большой вклад в развитие волновой теории света внесли Френель (1818), Кирхгофф (1882), Фраунгофер (1821) и др. В 60-х годах XIX века Максвелл, обобщив экспериментальные результаты и законы электромагнетизма, разработал единую теорию электромагнитного поля, предсказавшую электромагнитную природу света.

По современным представлениям, свет – это сложный электромагнитный процесс, обладающий как волновыми, так и корпускулярными свойствами.

В основе волновой оптики лежат уравнения Максвелла и вытекающие из них соотношения для электромагнитных волн.

Настоящее учебно-методическое пособие является руководством к лабораторным работам по разделу «Оптика». До начала лабораторных занятий студенты должны внимательно его изучить и создать заготовку отчёта, содержащую вычисления погрешностей (пункты 1-7 в описании каждой из лабораторных работ). Таблицы в заготовке отчёта заполняют после выполнения работы. Результаты измерения и расчёты, включая вычисление погрешностей, заполняются в черновик. По окончании выполнения задания необходимо показать преподавателю черновик, в котором он должен расписаться. В оставшееся время студенты заполняют отчёт.

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ПОМОЩИ РЕФРАКТОМЕТРА

Цель работы: изучение явления преломления света и явления полного внутреннего отражения, а также ознакомление со способом измерения показателя преломления с помощью рефрактометра.

Краткая теория

В оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно. Абсолютный показатель преломления среды равен

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1.1)$$

где c – скорость распространения света в вакууме, v – скорость распространения света в данной среде.

Относительный показатель преломления двух сред n_{21} равен

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1.2)$$

где n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления этих сред.

Из формул (1.1) и (1.2) легко получить, что

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Таким образом, показатель преломления связан со скоростью света в вещественной среде: абсолютный показывает, во сколько раз она меньше, чем в вакууме, а относительный – во сколько раз отличаются скорости света в двух различных средах.

Если свет переходит из одной среды в другую, то на границе раздела этих сред происходит его отражение и преломление (рис. 1.1). Согласно закону преломления для изотропных диэлектрических сред выполняется соотношение:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{21}, \quad (1.3)$$

где i – угол падения светового луча, r – угол преломления, n_{21} – относительный показатель преломления двух сред (показатель преломления второй среды относительно первой) k – угол отражения светового луча (рис. 1.1).

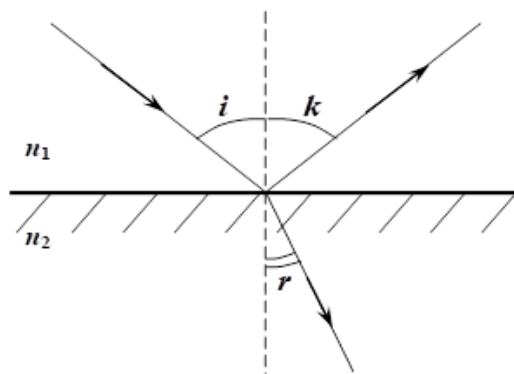


Рис. 1.1. Отражение и преломление света на границе раздела двух сред

В данной работе для определения показателя преломления жидкостей используется рефрактометр УРЛ-1, принцип действия которого основан на явлении полного внутреннего отражения. Рассмотрим это явление.

Пусть расходящийся пучок света от источника S переходит из среды, оптически более плотной, с абсолютным показателем преломления n_1 в среду, оптически менее плотную, с показателем преломления n_2 (рис. 1.2). В этом случае $n_1 > n_2$ и угол преломления будет больше угла падения. При некотором угле падения i_0 угол преломления r_0 будет равен 90° и $\sin r_0 = 1$. Тогда из (1.2) и (1.3) получаем следующее:

$$\sin i_0 = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.4)$$

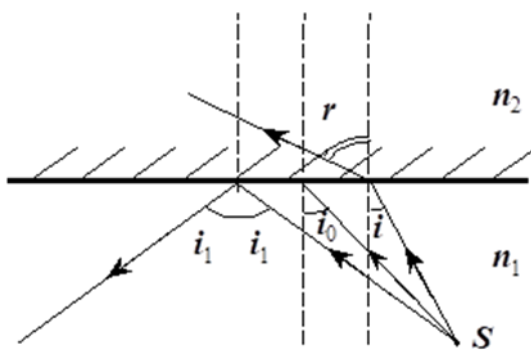


Рис. 1.2. Ход лучей при переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду ($n_1 > n_2$)

Для углов падения больших, чем i_0 , синус угла преломления формально оказывается больше единицы, то есть угол преломления имеет мнимое значение. При этом преломленный луч исчезает, а интенсивность отраженного луча равна интенсивности луча падающего, то есть падающий луч не проникает во вторую среду, а полностью отражается в первую. Это явление называется полным внутренним отражением, а угол i_0 носит название предельного угла полного внутреннего отражения.

Наблюдатель во второй среде видит в поле зрения только ту часть лучей, для которой угол падения i меньше предельного. Остальная часть поля зрения будет темной, так как она соответствует лучам с углами падения большими предельного. Положение границы между освещенной и темной частями поля зрения определяется лучами, падающими под предельным углом.

Необходимые приборы и материалы

Рефрактометрами называют приборы, предназначенные для определения показателя преломления различных веществ. Работа универсального лабораторного рефрактометра УРЛ-1 основана на явлении полного внутреннего отражения и фиксации границы светотени. Основным элементом оптической системы рефрактометра являются две одинаковые стеклянные призмы P_1 и P_2 (рис. 1.3), сложенные диагональными сторонами. Между ними помещается слой исследуемой жидкости. От источника света на грань BC осветительной призмы P_1 падает расходящийся пучок света. Часть лучей, преломившихся в призме P_1 , падает на грань CD под углом меньше предельного. Эти лучи проходят через измерительную призму P_2 и создают освещенную часть поля зрения.

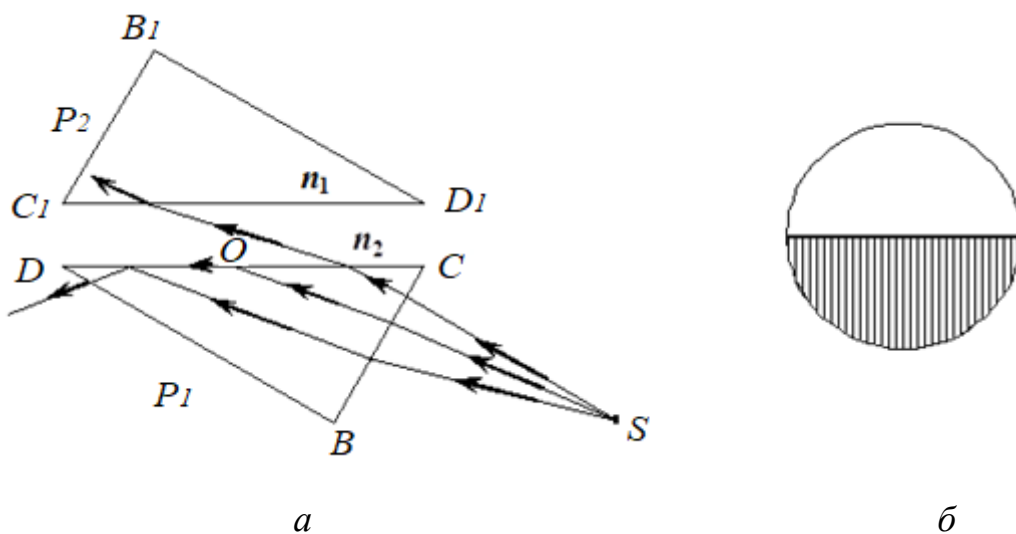


Рис. 1.3. Образование границы светотени в поле зрения рефрактометра:
а - ход лучей через призмы; б - граница светотени в поле зрения окуляра

Другая часть падает на грань CD под углом больше предельного и претерпевает полное внутреннее отражение. Соответствующая часть поля зрения будет темной. Точка O , находящаяся на границе светлой и темной частей поля зрения, соответствует падению луча под предельным углом. Каждому веществу соответствует определенное положение границы светотени в поле зрения наблюдателя.

Шкала рефрактометра проградуирована непосредственно в значениях показателя преломления исследуемого вещества. Прибор позволяет измерять показатель преломления в пределах 1,2–1,7 с точностью до четвертого знака после запятой.

Оптическая схема рефрактометра изображена на рис. 1.4.

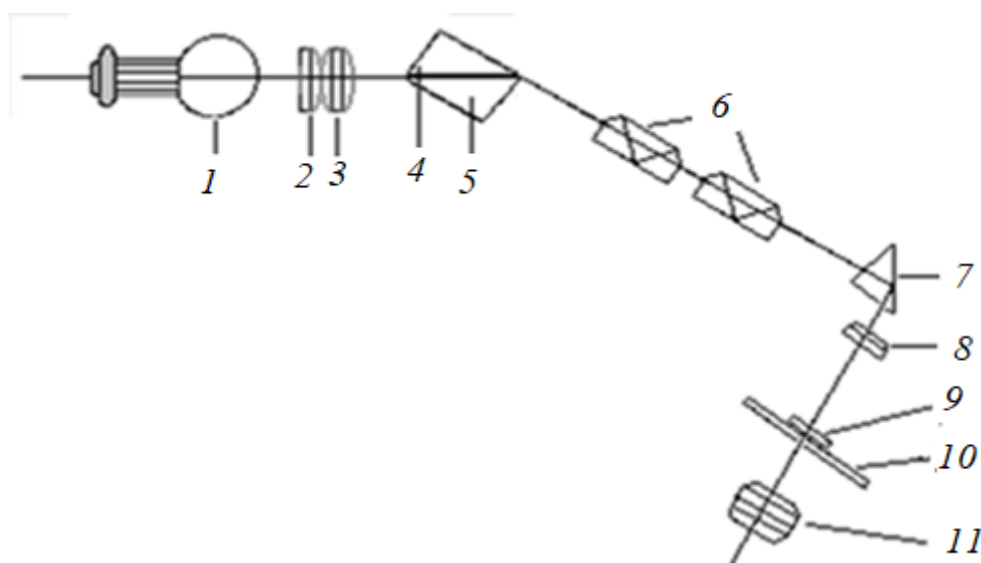


Рис. 1.4. Оптическая схема рефрактометра УРЛ-1

Исследуемую жидкость помещают между плоскостями двух призм – осветительной (4) и измерительной (5). От источника света (1) конденсорами (2, 3) расходящийся пучок света направляется на входную грань осветительной призмы, затем проходит тонкий слой исследуемой жидкости и преломляется на границе исследуемого вещества и плоскости измерительной призмы. Лучи, преломленные под различными углами, фокусируются объективом (8) зрительной трубы, образуя светлую и темную части поля зрения, разделенные прямолинейной границей светотени. Границу светотени образуют лучи, падающие под предельным углом.

Для фиксации положения границы светотени относительно неподвижной шкалы (10) зрительная труба вращается относительно оси. Через окуляр (11) зрительной трубы наблюдается граница светотени, перекрестие сетки (9) и шкала (10).

Для компенсации дисперсии вышедших из измерительной призмы лучей в зрительной трубе установлены две призмы прямого зрения (6), вращающиеся относительно оси зрительной трубы. Путем вращения призмы устанавливаются в такое положение, при котором граница светотени не имеет спектральной окраски. После этого граница светотени совмещается с центром перекрестия сетки и производится отсчет по шкале.

Общий вид прибора показан на рис. 1.5. Конструктивно прибор УРЛ-1 состоит из двух основных частей: основания (1) и корпуса (2). К корпусу прибора крепятся камеры: верхняя (5) и нижняя (3). Нижняя камера, заключающая в себе

измерительную призму, неподвижно закреплена на корпусе, а верхняя, заключающая в себе осветительную призму, соединена шарниром с нижней и может поворачиваться относительно нее.

Нижняя и верхняя камеры имеют окна, закрываемые пробкой. К нижней камере прикреплен подвижный осветитель (4), свет которого направляется в окно одной из камер.

На оси прибора укреплены:

- рукоятка (9) с окуляром (8) и настроечным механизмом (11), облегчающим совмещение границы светотени с перекрестием сетки;
- лимб дисперсии (6) для устранения окрашенности границы светотени, наблюдаемой в окуляр;
- механизм наведения, находящийся внутри корпуса, который вместе с рукояткой может поворачиваться на оси вдоль шкалы (7).

На передней стенке основания расположен выключатель для включения осветителя.

На боковой стенке расположен шнур с вилкой (10) для подключения прибора к сети.

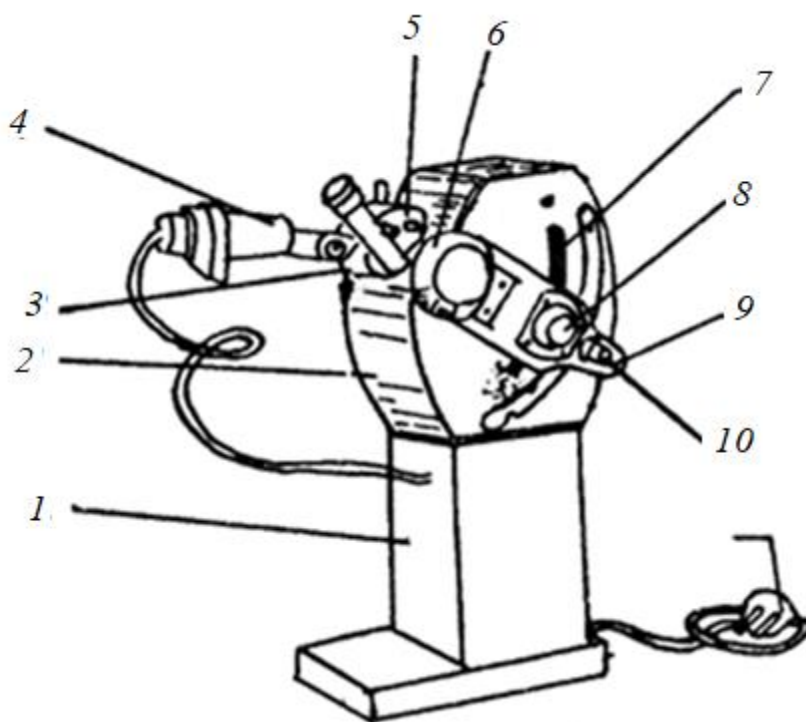


Рис. 1.5. Общий вид рефрактометра УРЛ-1

Порядок выполнения работы

Снять пробку с окна верхней камеры, окно нижней камеры должно быть закрыто.

1. Открыть верхнюю камеру и промыть дистиллированной водой или спиртом поверхности осветительной и измерительной призм и насухо вытереть салфеткой.
2. Из пипетки нанести на плоскость измерительной призмы 1–2 капли исследуемой жидкости и закрыть верхнюю камеру.
3. Перемещая осветитель, направить луч света в окно верхней камеры.
4. Смотря в окуляр, поворачивать рукоятку с окуляром до тех пор, пока граница светотени не окажется в поле зрения.
5. Резкость границы светотени, штрихов шкалы, и перекрестия сетки настроить вращением гайки окуляра.
6. Вращением рукоятки дисперсионного компенсатора устранить окрашенность границы светотени.
7. Вращением настроечного механизма совместить границу светотени с перекрестием сетки.
8. Снять отсчет по шкале показателей преломления по границе светотени.
9. Измерения провести пять раз для каждой жидкости. Результаты измерений занести в табл. 1.1.
10. Найти среднее значение показателя преломления для каждой исследуемой жидкости и вычислить погрешность измерения.

Таблица 1.1

Результаты измерений

Номер п/п	Вода		Глицерин		Спирт		Раствор сахара	
	$n_{\text{в}}$	$(\bar{n}_{\text{в}} - n_{i\text{в}})^2$	$n_{\text{г}}$	$(\bar{n}_{\text{г}} - n_{i\text{г}})^2$	$n_{\text{сп}}$	$(\bar{n}_{\text{сп}} - n_{i\text{сп}})^2$	$n_{\text{сх}}$	$(\bar{n}_{\text{сх}} - n_{i\text{сх}})^2$
1								
2								
3								
4								
5								
$\bar{n}$	$\bar{n}_{\text{в}} =$		$\bar{n}_{\text{г}} =$		$\bar{n}_{\text{сп}} =$		$\bar{n}_{\text{сх}} =$	

11. Показатель преломления зависит от температуры, поэтому следует указать комнатную температуру, при которой проводились измерения.

12. После окончания работы прибор промыть дистиллированной водой или спиртом, поверхности призм вытереть досуха салфеткой.

Вычисление погрешностей

1. Определить среднее арифметическое значение для показателя преломления для каждой исследуемой жидкости:

$$\bar{n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n n_i,$$

где N – число опытов.

2. Необходимо вычислить квадраты случайных отклонений $(\bar{n} - n_i)^2$ и записать их в таблицу.

3. Вычислить среднеквадратичное отклонение среднего арифметического:

$$S_{\bar{n}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{n} - n_i)^2}.$$

4. Определить коэффициент Стьюдента $t_{p,N}$, согласно выбранной доверительной вероятности p и числа опытов N в данной серии измерений (где $t_{p,N}=2,78$ для $N=5$ и $p=0,95$.).

5. Вычислить случайную погрешность для показателя преломления для каждой исследуемой жидкости по формуле:

$$\Delta_n = t_{p,N} \cdot S_{\bar{n}}.$$

6. Записать окончательный результат для показателя преломления для каждой исследуемой жидкости в виде:

$$n = \bar{n} \pm \Delta_n.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Что называется «относительным» и «абсолютным» показателем преломления вещества?

2. Сформулируйте закон преломления света.

3. В чем заключается явление полного внутреннего отражения? При каких условиях оно наблюдается?

4. Объясните принцип действия рефрактометра.

5. Расскажите порядок выполнения лабораторной работы.

6. Задача. Вычислите предельный угол полного внутреннего отражения для стекла ($n_1 = 1,6$) и алмаза ($n_2 = 2,4$). Ответ: 39° и 24° .

7. Задача. Предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-жидкость равен 70° . Чему равен показатель преломления жидкости, если $n_{\text{стекла}} = 1,6$. Ответ: 1,5.

Лабораторная работа № 2

ИЗМЕРЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ ЦИФРОВЫМ МИКРОСКОПОМ ПРИ ПОМОЩИ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

Цель работы: *изучение явления интерференции света и использование этого явления для измерения радиуса кривизны поверхности линзы.*

Краткая теория

Свет представляет собой электромагнитные волны. Волновая природа света проявляется в таких явлениях, как интерференция, дифракция, поляризация, дисперсия световых волн.

Интерференцией света называется явление наложения двух (или нескольких) когерентных световых волн, сопровождающееся перераспределением светового потока в пространстве. Интенсивность света в каждой точке становится строго определенной и не изменяется с течением времени. В частности, есть точки, в которых интенсивность света максимальна, и есть точки, в которых она минимальна.

Источники света и световые волны, испускаемые ими, называются когерентными, если они имеют строго одинаковую частоту и постоянную разность фаз.

Естественные и искусственные источники света (за исключением лазеров) не когерентны. При наложении световых волн, испускаемых ими, световой поток, как правило, просто усиливается. Чтобы наблюдать явление интерференции света с использованием такого источника, приходится пространственно разделять световую волну, испускаемую им, на две или несколько волн. Эти волны когерентны, и при их наложении будет наблюдаться интерференционная картина.

Выведем формулы, выражающие условия максимумов и минимумов интенсивности света, возникающих при его интерференции.

Пусть в некоторой точке пространства O происходит разделение световой волны на две когерентных волны. До точки M , в которой происходит наложение волн и наблюдается интерференция, первая волна проходит расстояние S_1 в среде с показателем преломления n_1 , вторая волна расстояние S_2 в среде с показателем преломления n_2 .

Расстояния S_1 и S_2 называются геометрическими длинами путей волн.

Пусть в точке O фаза колебаний, создаваемых каждой волной, равна ωt , где ω – циклическая частота колебаний, а t – время. Тогда в точке M первая волна возбudit колебание, фаза которого равна

$$\varphi_1 = \omega \left(t - \frac{S_1}{v_1} \right),$$

а вторая волна – колебание, фаза которого равна

$$\varphi_2 = \omega \left(t - \frac{S_2}{v_2} \right),$$

где v_1 и v_2 – фазовые скорости первой и второй волн.

Характеристики волн связаны следующими соотношениями:

$$v_1 = \frac{c}{n_1}, \quad v_2 = \frac{c}{n_2}, \quad \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda},$$

где c – скорость света в вакууме, λ – длина волны в вакууме.

С учетом этих соотношений найдем разность фаз $\Delta\varphi$ двух когерентных волн:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \omega \left(\frac{S_2}{v_2} - \frac{S_1}{v_1} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_2 S_2 - n_1 S_1) = \frac{2\pi}{\lambda} (L_2 - L_1),$$

где $L_1 = n_1 S_1$ и $L_2 = n_2 S_2$ – оптические длины путей волн.

Величина, равная разности оптических длин путей двух волн, называется их оптической разностью хода: $\Delta = L_2 - L_1$.

Окончательно получаем для разности фаз:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta. \quad (2.1)$$

Из формулы (2.1) следует, что если оптическая разность хода двух волн для некоторой точки пространства равна целому числу длин волны в вакууме:

$$\Delta = \pm k\lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.2)$$

то разность фаз этих волн равна: $\Delta\varphi = \pm 2\pi k$.

Колебания, возбуждаемые в этой точке двумя волнами, происходят в одинаковой фазе и усиливают друг друга. Следовательно, выражение (2.2) является условием интерференционного максимума.

Если оптическая разность хода равна нечетному числу половин длины волны:

$$\Delta = \pm(2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.3)$$

то разность фаз равна: $\Delta\varphi = \pm(2k + 1)\pi$.

Колебания, возбуждаемые в данной точке, происходят в противофазе и ослабляют друг друга. Следовательно, выражение (2.3) является условием интерференционного минимума.

Оптическая система для наблюдения колец Ньютона изображена на рис. 2.1. На плоскую стеклянную пластинку помещена плосковыпуклая линза с большим радиусом кривизны R . Точка O – центр кривизны ее нижней поверхности. Свет падает на плоскую поверхность линзы. Вокруг точки соприкосновения линзы с поверхностью пластинки видны концентрические кольца: светлые и темные, если падающий свет монохроматический (имеющий определенную частоту), и цветные и темные, если падающий свет немонахроматический (представляющий собой совокупность волн различных частот).

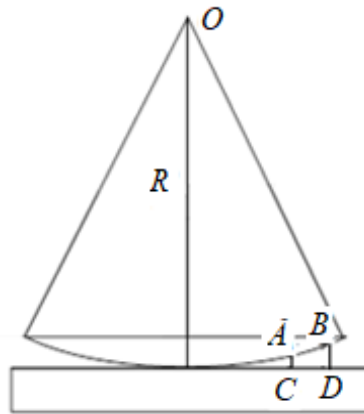


Рис. 2.1. Оптическая система

Эти кольца образуются в результате интерференции волн, отражающихся от границ воздушного промежутка между линзой и пластинкой. В работе наблюдение колец ведется в отраженном свете при нормальном падении световых лучей.

Ход лучей показан на рис. 2.2. Участок AB представляет собой малую часть нижней поверхности линзы в сильно увеличенном виде, а CD – малую часть верхней поверхности пластинки под ней.

Пусть луч света падает на границу раздела линзы и воздушного промежутка в точке a (рис. 2.2). Этот луч частично отражается от нижней поверхности линзы, частично преломляется и проникает в воздушный промежуток, отражается от верхней поверхности пластинки в точке b и снова достигает нижней поверхности линзы в точке c . Таким образом, падающий свет разделяется на две части. Луч I изображает свет, отраженный от нижней поверхности линзы в точке a , а луч II – свет, прошедший воздушный промежуток и отраженный от верхней поверхности пластинки в точке b .

Если ширина воздушного промежутка достаточно мала, световые волны, соответствующие лучам I и II, можно считать когерентными. Найдем оптическую разность хода этих волн.

Точки a и c находятся очень близко друг от друга, а кривизна поверхности линзы мала, поэтому ширину воздушного промежутка в этих точках будем считать одинаковой и равной d .

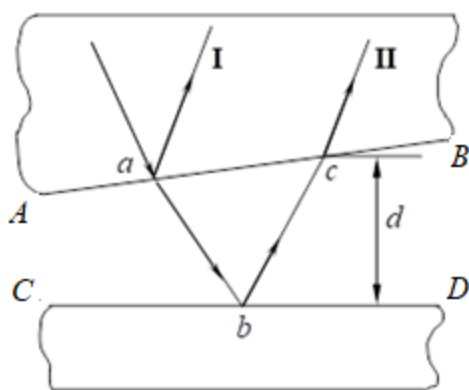


Рис. 2.2. Ход световых лучей в воздушном промежутке

Геометрическая разность хода волн равна расстоянию, проходимому лучом II в воздушном промежутке, $|ab + bc|$, которое при нормальном падении равно $2d$. Абсолютный показатель преломления воздуха можно принять равным 1. Кроме того, при отражении световой волны от оптически более плотной среды в точке b фаза колебаний изменяется на π рад, что эквивалентно увеличению оптической длины пути волны на $\lambda/2$.

Оптическая разность хода I и II волн равна:

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2}. \quad (2.4)$$

Если ширина воздушного промежутка d такова, что оптическая разность хода Δ равна нечетному числу половин длины волны, то колебания, возбуждаемые волнами I и II, полностью ослабляют друг друга, и участок AB выглядит темным в соответствии с условием минимума (2.3).

А если оптическая разность хода Δ равна целому числу длин волны, то колебания максимально усиливают друг друга, и участок AB выглядит светлым в соответствии с условием максимума (2.2).

Ширина воздушного промежутка непрерывно увеличивается от точки соприкосновения линзы с пластинкой к краю линзы (рис. 2.3), поэтому и оптическая разность хода волн также непрерывно изменяется. Она пробегает ряд последовательных значений, среди которых есть значения, равные целому числу длин волны, и есть значения, равные нечетному числу половин длины волны. Следовательно, на границе поверхности линзы и воздушного промежутка чередуются светлые и темные участки. Воздушный промежуток радиально симметричен, и эти участки имеют вид концентрических светлых и темных колец.

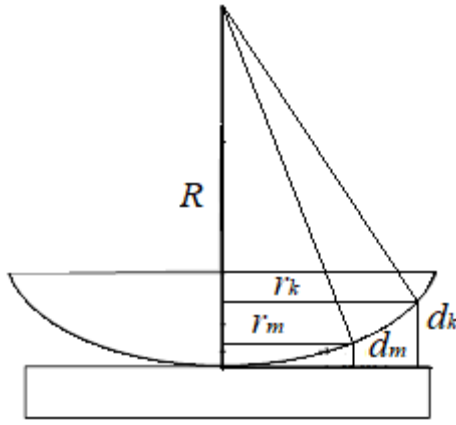


Рис. 2.3. Изменение ширины воздушного промежутка

В центре этой интерференционной картины находится темное пятно, соответствующее условию минимума (2.3) при $k = 0$. При этом из формулы (2.4) видно, что $d = 0$. Далее следует первое светлое кольцо, соответствующее условию максимума (2.2) при $k = 1$. Затем первое темное кольцо, соответствующее условию минимума (2.3) при $k = 1$. При этом $d = \lambda/2$ согласно формуле 2.4.

Рассматривая картину в таком порядке, последовательно перенумеруем все кольца.

Выведем формулу для расчета радиуса кривизны поверхности линзы.

Условие интерференционного минимума для темных колец с номерами k и m согласно (2.3) и (2.4) имеет вид:

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

$$\Delta_m = 2d_m + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1)\frac{\lambda}{2},$$

где Δ_k и d_k – соответственно оптическая разность хода волн и ширина воздушного промежутка для темного кольца с номером k ; Δ_m и d_m – соответственно оптическая разность хода волн и ширина воздушного промежутка для темного кольца с номером m (рис. 2.3).

Вычитая из первого уравнения второе, получим:

$$d_k - d_m = (k - m)\frac{\lambda}{2}. \quad (2.5)$$

Выразим ширину воздушного промежутка d_k через радиус темного кольца r_k и радиус кривизны поверхности линзы R (рис. 2.3). По теореме Пифагора:

$$r_k^2 = R^2 - (R - d_k)^2 = 2Rd_k - d_k^2.$$

Учитывая, что $R \gg d_k$, получаем:

$$d_k = \frac{r_k^2}{2R}.$$

Аналогично –

$$d_m = \frac{r_m^2}{2R}.$$

Подставляя эти выражения в уравнение (2.5), находим:

$$\frac{r_k^2 - r_m^2}{2R} = \frac{(k - m)\lambda}{2},$$

откуда можно выразить радиус кривизны поверхности линзы:

$$R = \frac{(r_k - r_m)(r_k + r_m)}{\lambda(k - m)}. \quad (2.6)$$

Сделав замену $r_k = D_k/2$ и $r_m = D_m/2$, где D_k и D_m – диаметры темных колец, получим другой вид выражения (2.6):

$$R = \frac{(D_k - D_m)(D_k + D_m)}{4\lambda(k - m)}. \quad (2.7)$$

Необходимые приборы и материалы

Лабораторный стенд (рис. 2.4) включает в себя оптическую скамью (1) со стойкой источника когерентного излучения (лазера 2) (длина волны $\lambda = 405$ нм) и оптическим боксом (5), обеспечивающих установку оптических элементов в требуемой конфигурации. Оптическая система для наблюдения колец Ньютона смонтирована внутри оптического бокса, в котором также находится светоделительная пластина. Для наблюдения и фотографирования интерференционной картины используется цифровой микроскоп, подключенный к компьютеру (6). Установка оснащена сдвижным светонепроницаемым кожухом, который препятствует попаданию внешнего света в оптический бокс.

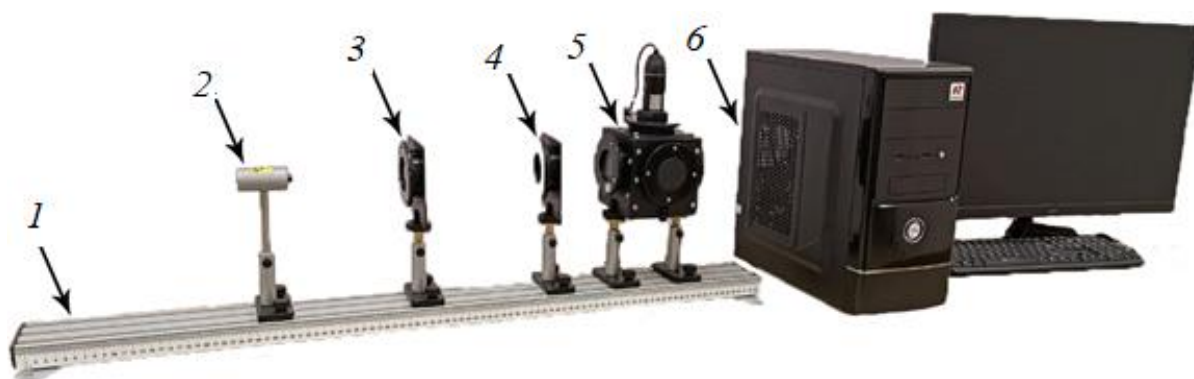


Рис. 2.4 Лабораторный стенд:

1 – оптическая скамья; 2 – лазер; 3 – линза; 4 – поляризатор;
5 – оптический бокс с цифровым микроскопом; 6 – компьютер

Порядок выполнения работы

1. Включить компьютер и лазер. С помощью линз направьте световой поток лазера на входное окно оптического бокса. Откройте программу HiView. На экране монитора появляется изображение интерференционной картины (рис. 2.5). Вращая поляририд, подберите оптимальную яркость изображения. Медленно поворачивая светоделительную пластину, добейтесь того, чтобы кольца Ньютона были отчетливо видны.

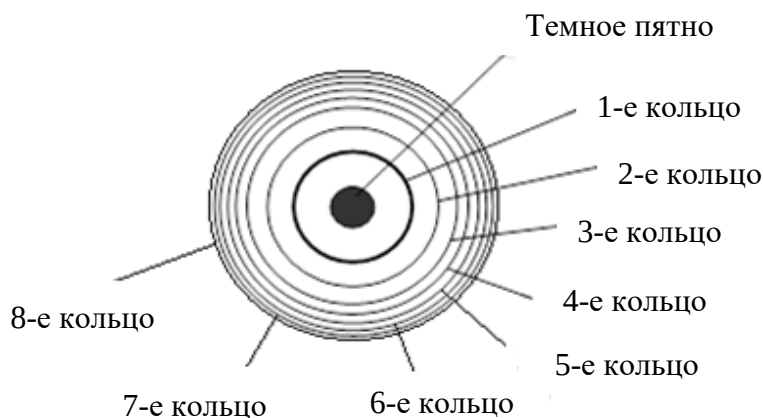


Рис. 2.5. Изображение на экране монитора

2. Произвести калибровку измерительной линейки. Для этого на панели инструментов нажмите компьютерной мышью значок «калибровка». На экране появится изображение шкалы микроскопа и на его фоне – окно, в котором также нажмите мышью значок «калибровка». Задайте длину измерительной линейки в миллиметрах по числу делений шкалы, которые укладываются на длине линейки. Например, на линейке укладывается 6 делений шкалы микроскопа. В окне вводят 6 мм и нажимают сначала значок «конечно», а затем – значок «заявление». На экране появляется система координат в миллиметрах.

3. Измерить радиусы 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8 темных колец. Для этого на панели инструментов нажать значок «концентрические круги». Мышью вывести курсор в начало координат, нажать левую кнопку мыши и, удерживая ее, переведите курсор на 1-е темное кольцо, после чего отпустить кнопку. Появившийся при этом круг накладывайте на 1-е темное кольцо, и около кольца возникнет измеренное значение его радиуса R_2 . Далее опять вывести курсор в начало координат, нажать левую кнопку мыши и, удерживая ее, наложить курсором следующий появившийся круг на 2-е темное кольцо, после чего отпустить кнопку. Около кольца появится значение его радиуса R_2 . Таким же образом измерить радиусы всех остальных колец.

4. Закрыть программу и выключить компьютер и лазер.

5. Вычислить радиус кривизны поверхности линзы R по формуле (2.6). При этом пары колец взять в определенной последовательности, например, 7-е и 4-е, 6-е и 3-е, 5-е и 2-е, 4-е и 1-е. Величины r_k и λ необходимо выразить в одних и тех же единицах, например, в миллиметрах. Тогда и радиус кривизны получится в этих же единицах. Результаты занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты измерений

Номер кольца	Радиус кольца, мм	Радиус кривизны линзы, R , мм	$(\bar{R} - R_i)^2$, мм ²
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
Среднее значение $\bar{R} =$			$\sum_{i=0}^n (\bar{R} - R_i)^2 =$

6. По полученным четырем значениям R вычислить среднее значение радиуса кривизны $\bar{R}$, а также среднюю погрешность измерения.

Вычисление погрешностей

1. Определить среднее арифметическое значение для радиуса кривизны линзы:

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n R_i,$$

где N – число опытов.

2. Вычислить квадраты случайных отклонений $(\bar{R} - R_i)^2$ и записать их в таблицу.

3. Вычислить среднеквадратичное отклонение среднего арифметического:

$$S_{\bar{R}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=0}^n (\bar{R} - R_i)^2}.$$

4. Определить коэффициент Стьюдента $t_{p,N}$ согласно выбранной доверительной вероятности p и числа опытов N в данной серии измерений (где $t_{p,N}=3,18$ для $N=4$ и $p=0,95$).

5. Вычислить случайную погрешность для радиуса кривизны линзы по формуле:

$$\Delta_R = t_{p,N} \cdot S_{\bar{R}}.$$

6. Записать окончательный результат для показателя преломления для каждой исследуемой жидкости в виде:

$$R = \bar{R} \pm \Delta_R.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое «интерференция света»?
2. Какие волны являются когерентными?
3. Какой свет является монохроматичным?
4. Дайте определение разности хода лучей и их типов.
5. Нарисуйте оптическую систему для наблюдения колец Ньютона. Изобразите ход лучей.
6. Запишите условие интерференционного максимума и минимума.
7. Как можно определить радиус кривизны линзы?

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОБИРАЮЩЕЙ И РАССЕИВАЮЩЕЙ ЛИНЗ

Цель работы: *определение главного фокусного расстояния собирающей и рассеивающей линзы.*

Краткая теория

Прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями или сферической и плоской поверхностями, называют линзой. Линзы, которые ограничены двумя сферическими поверхностями, бывают двояковыпуклые, двояковогнутые, вогнуто-выпуклые и выпукло-вогнутые (рис. 3.1). Линзы, ограниченные с одной стороны плоскостью, а с другой сферической поверхностью, делятся на плосковыпуклые и плосковогнутые (рис. 3.1). Дополнительно линзы отличаются друг от друга радиусами кривизны их сферических поверхностей, положением центров их сферических поверхностей и показателем преломления материала, из которого они изготовлены.



Рис. 3.1. Виды линз:

a – двояковыпуклая; *б* – плосковыпуклая; *в* – вогнуто-выпуклая;
г – двояковогнутая; *д* – плосковогнутая; *е* – выпукло-вогнутая

Тонкая линза. Собирающая и рассеивающая линза

Прямую O_1O_2 , называют главной оптической осью линзы (рис. 3.2). Луч света, проходящий по главной оптической оси, не меняет своего направления. Другие прямые, которые проходят через оптический центр линзы, называются побочными оптическими осями. Лучи света, проходящие по этим осям, меняют своё направление, параллельно смещаясь относительно своего первоначального направления. В случае, когда толщина линзы l много меньше, чем её радиусы кривизны R_1 и R_2 , она называется тонкой (см. рис. 3.2). При условии, что линза тонкая, можно предположить, что $l \rightarrow 0$ и точка A сливается с точкой B в точке O , которая является оптическим центром линзы (см. рис. 3.2).

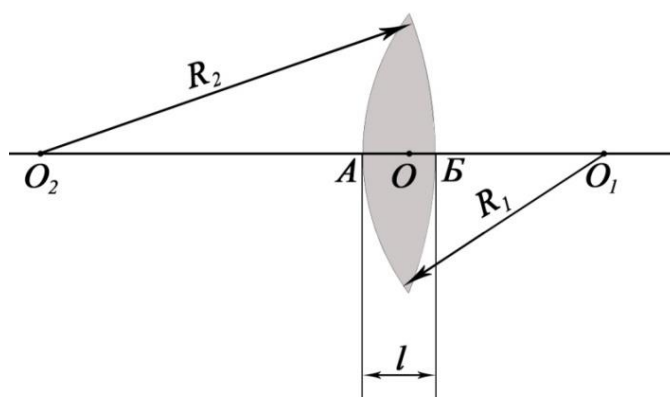


Рис. 3.2. Тонкая линза

Линзы делятся на собирающие и рассеивающие. Собирающие линзы являются выпуклыми, и их толщина в центральной части больше, чем толщина линзы на краях. Рассеивающие линзы тоньше в центральной части по сравнению с её краями. Если лучи света попадают в собирающую линзу параллельно её главной оптической оси, то при выходе из неё они сходятся в точке и образуют действительное изображение (рис. 3.3, а). В рассеивающей линзе лучи, параллельные главной оптической оси, при выходе из неё расходятся. Они не пересекаются друг с другом, а пересекаются только их мнимые продолжения (рис. 3.3, б). Поэтому изображение в рассеивающей линзе называют мнимым. Как правило, коэффициент преломления материала, из которого изготовлена линза, больше, чем коэффициент преломления среды, где она находится. В случае когда коэффициент преломления линзы меньше, чем коэффициент преломления среды, то собирающие линзы становятся рассеивающими и, наоборот, рассеивающие линзы становятся собирающими. Точка, в которой пересекаются лучи, распространяющиеся параллельно главной оптической оси после преломления в собирающей линзе, называется главным фокусом линзы (см. рис. 3.3, а). Фокус линзы обозначается символом F . Расстояние от центра линзы до фокуса называется «фокусным расстоянием». Оно, так же как и фокус, обозначается символом F . В рассеивающей линзе главный фокус называется «мнимым» и расположен на противоположной стороне, чем у собирающей линзы (см. рис. 3.3, б). Для рассеивающей линзы фокусные расстояния берут с отрицательным знаком. При этом передние и задние фокусные расстояния у обоих типов линз зависят от радиусов кривизны и могут отличаться друг от друга.

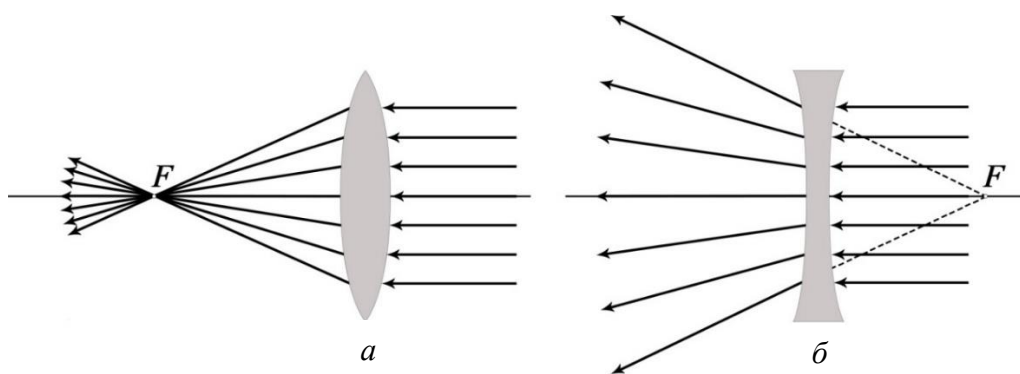


Рис. 3.3 Типы линз: *a* – собирающая линза; *б* – рассеивающая линза

Если направить свет на линзу параллельно её побочной оптической оси, то пересечение лучей света произойдет не в главном фокусе. При дальнейшем изменении угла наклона лучей, падающих на линзу, место их пересечения будет также изменяться. Точки пересечения лучей, направленных под углом и параллельно к главной оптической оси, будут располагаться на плоскости, которая проходит через главный фокус и ориентирована перпендикулярно главной оптической оси. Эту плоскость называют фокальной плоскостью, а точки пересечения побочной оптической оси с фокальной плоскостью называют побочным фокусом. В собирающей линзе передняя фокальная плоскость расположена перед линзой, задняя фокальная плоскость – за линзой. В рассеивающей линзе – наоборот. Если поместить точечный источник света в фокус линзы или в любую точку на фокальной плоскости, то после преломления в линзе лучи света будут параллельны друг другу (рис. 3.4).

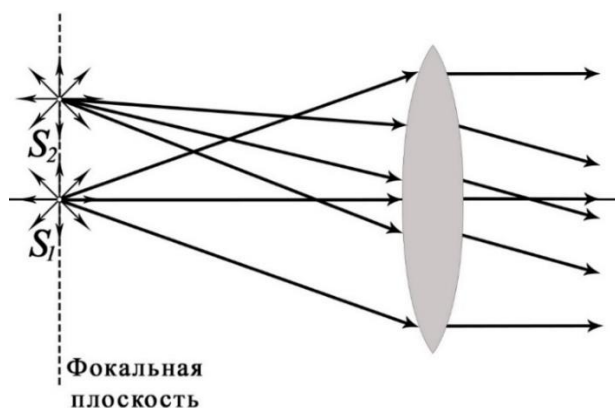


Рис. 3.4. Ход лучей света в собирающей линзе от точечных источников, которые расположены в фокальной плоскости

При размещении точечного источника света S между передней фокальной плоскостью и собирающей линзой преломленные лучи будут расходиться, и изображение источника света S_1 получится мнимым (рис. 3.5, *a*). Если источник света S сместить за фокальную плоскость, то лучи света, проходящие через линзу, будут сходиться и получится действительное изображение источника света S_1 (рис. 3.5, *б*).

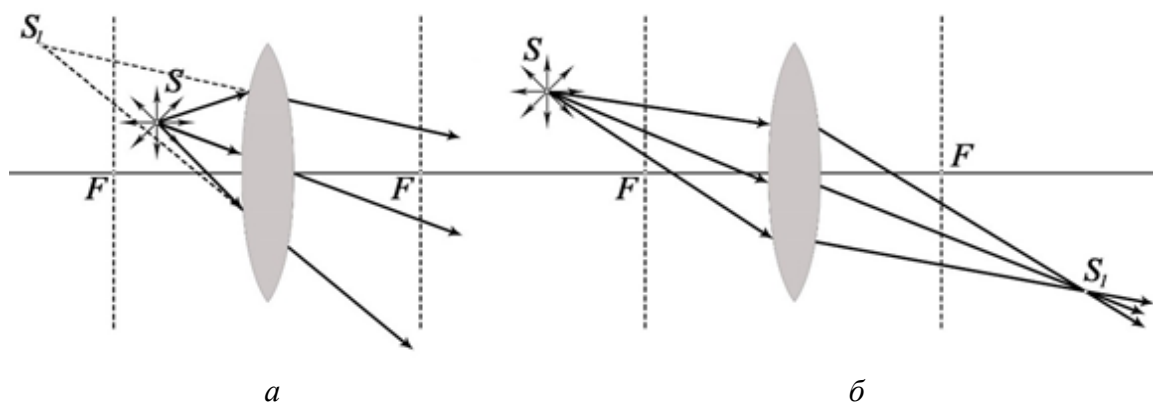


Рис. 3.5. Ход лучей в собирающей линзе:

a – точечный источник света расположен между фокальной плоскостью и линзой;

б – точечный источник света расположен перед фокальной плоскостью

Величину, обратную фокусному расстоянию, называют оптической силой линзы и обозначают символом D :

$$D = \pm \frac{1}{|d|} \quad (3.1)$$

Оптическая сила линзы определяет, насколько сильно она преломляет лучи. Из формулы (3.1) очевидно, чем меньше фокусное расстояние линзы, тем больше её оптическая сила. Оптическая сила собирающей линзы положительная $D > 0$, тогда как оптическая сила рассеивающей линзы отрицательна $D < 0$. Единицей измерения оптической силы является диоптрия [дптр]. Если система состоит из нескольких тонких линз, то оптическую силу системы можно рассчитать по следующей формуле:

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + \dots \quad (3.2)$$

Построение изображения в линзе

Свет, который исходит из точки на источнике света, после преломления в линзе снова собирается в точку. Таким образом, линза создаёт изображение предмета, от которого происходит излучение света. При рассмотрении изображений предметов, свет от которых проходит через тонкую линзу, нам не важна её форма, а достаточно знать только её фокусные расстояния. Поэтому на чертежах линзы изображают фигурами (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Графическое обозначение линз:

a – собирающая; *б* – рассеивающая

Для построения изображения предмета, которое даёт тонкая линза, нам достаточно знать ход трех лучей. Первый луч – это луч, который распространяется параллельно главной оптической оси, так как мы знаем, что после его преломления в линзе он пройдет через фокус. Обратно – второй луч – который пройдет через фокус, после преломления в линзе будет двигаться параллельно главной оптической оси. Третий луч – это луч, который проходит через оптический центр линзы без преломления, так как линза тонкая и смещением луча можно пренебречь. При построении изображения точки нам достаточно знать ход любых двух лучей из перечисленного списка. При помощи этих трех лучей построим изображение предмета AB в собирающей линзе (рис. 3.7). Изображение точки A будет лежать на пересечении трех типов лучей (точка A_1). Подобным образом можно взять любую точку на отрезке AB и построить её изображение. В итоге мы получим отрезок A_1B_1 , который является изображением отрезка AB . Из рис. 3.7 видно, что это изображение действительное, увеличенное и перевернутое.

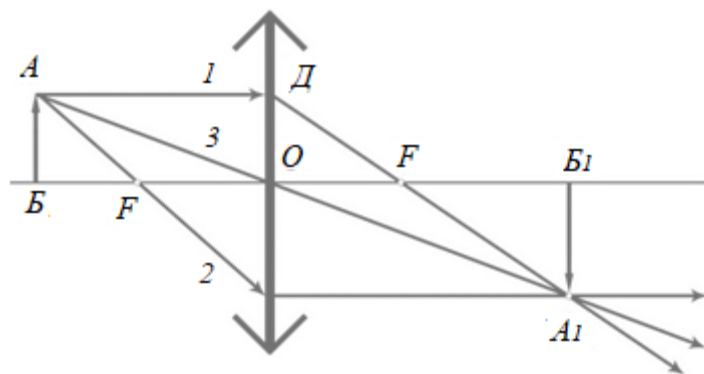


Рис. 3.7. Построение изображения в собирающей линзе

Формула тонкой линзы. Увеличение линзы

Треугольники AOB и A_1OB_1 подобны (см. рис. 3.7). Следовательно, их стороны подчиняются следующему соотношению:

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{OB}{OB_1}. \quad (3.3)$$

Треугольники DOF и A_1FB_1 также подобны (см. рис. 3.7). Поэтому можем записать, что $\frac{OD}{A_1B_1} = \frac{OF}{FB_1}$, так как $AB = OD$, то $\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{OF}{FB_1}$. Используя соотношение (3.3), запишем:

$$\frac{OB}{OB_1} = \frac{OF}{FB_1}. \quad (3.4)$$

Обозначим $OB = d$ и $OB_1 = f$. Из рис. 3.7 видно, что OF – это фокусное расстояние линзы $OF = F$ и $FB_1 = f - F$. Перепишем соотношение (3.4) с учетом новых обозначений:

$$\frac{d}{f} = \frac{F}{f - F}. \quad (3.5)$$

Преобразуем выражение (3.5), получим $d \cdot (f - F) = F \cdot f$, раскроем скобки $d \cdot f - d \cdot F = F \cdot f$, полученное выражение разделим на $F \cdot f \cdot d$, получим $\frac{1}{F} - \frac{1}{f} = \frac{1}{d}$. Окончательно запишем выражение:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \quad (3.6)$$

Уравнение (3.6) называется уравнением тонкой линзы. Если линза собирающая, то значение F берут положительным, а если рассеивающая, то отрицательным. Перед членом уравнения $\frac{1}{f}$ ставят знак плюс, если изображение действительное, и минус, если изображение мнимое. Перед членом уравнения $\frac{1}{d}$ ставят знак плюс, если на линзу падает расходящийся пучок, и минус, если сходящийся. Из уравнения (3.6) видно, что если на линзу падает параллельный пучок света ($d \rightarrow \infty$), то $\frac{1}{d} \rightarrow 0$ и $f = F$, и наоборот, если $f \rightarrow \infty$ и, как следствие $\frac{1}{f} \rightarrow 0$, то $d = F$.

Размер изображения предмета в линзе, как правило, отличается от размера самого предмета. Линейным увеличением называют отношение линейного размера изображения к линейному размеру предмета. Воспользуемся соотношением (3.3) и перепишем его с учетом обозначений:

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{d}{f}. \quad (3.7)$$

Линейное увеличение линзы Γ равно:

$$\Gamma = \frac{|d|}{|f|}. \quad (3.8)$$

Преобразуя формулу 3.6, получим выражение $F \cdot (f \pm d) = f \cdot d$, откуда выразим фокус линзы, где ставим «+» для собирающей линзы и «-» для рассеивающей.

$$F = \frac{f \cdot d}{(f \pm d)}. \quad (3.9)$$

Необходимые приборы и материалы

Лабораторный стенд представлен на рис. 3.8. Он состоит из осветителя (1), предмета (2), рассеивающей линзы (3), собирающей линзы (4), оптической скамьи (5); экрана (6).



Рис. 3.8. Лабораторный стенд:

1 – осветитель; 2 – предмет; 3 – рассеивающая линза; 4 – собирающая линза;
5 – оптическая скамья; 6 – экран

Порядок выполнения работы

1. Установить на оптическую скамью осветитель с предметом и экран.
2. Между предметом и экраном поставить собирающую линзу и перемещая её по оптической скамье добиться, чтобы на экране возникло отчетливое изображение предмета.
3. По миллиметровой шкале на оптической скамье измерить расстояние от предмета до линзы (d) и расстояние от линзы до экрана (f).
4. Повторить измерения пять раз при различных положениях собирающей линзы и экрана. Записать значения в табл. 3.1.
5. Определить, пользуясь формулой (3.9) для собирающей линзы, главное фокусное расстояние (F) собирающей линзы в каждом опыте и найти среднее значение с погрешностью измерения.

Таблица 3.1

Результаты измерений для собирающей линзы

Но- мер п/п	d , см	f , см	F_i , см	$(\bar{F} - F_i)^2$, см ²
1				
2				
3				
4				
5				
$\bar{F} =$				$\sum (\bar{F} - F_i)^2 =$

6. Разместить на оптической скамье собирающую линзу так, чтобы на экране было четкое уменьшенное изображение предмета. Записать положение экрана ($X_Э$), используя миллиметровую шкалу на оптической скамье.

7. Установить между собирающей линзой и экраном (ближе к собирающей линзе) рассеивающую линзу. Перемещая экран по оптической скамье, получите четкое изображение предмета.

8. С помощью миллиметровой шкалы определить расстояние от рассеивающей линзы до экрана (d') и расстояние (f') от рассеивающей линзы до начального положения экрана ($X_Э$).

9. Повторить измерения пять раз при различных положениях рассеивающей линзы и экрана (рис. 3.9). При перемещении рассеивающей линзы и экрана значение $X_Э$ не изменяется. Запишите значения в табл. 3.2.

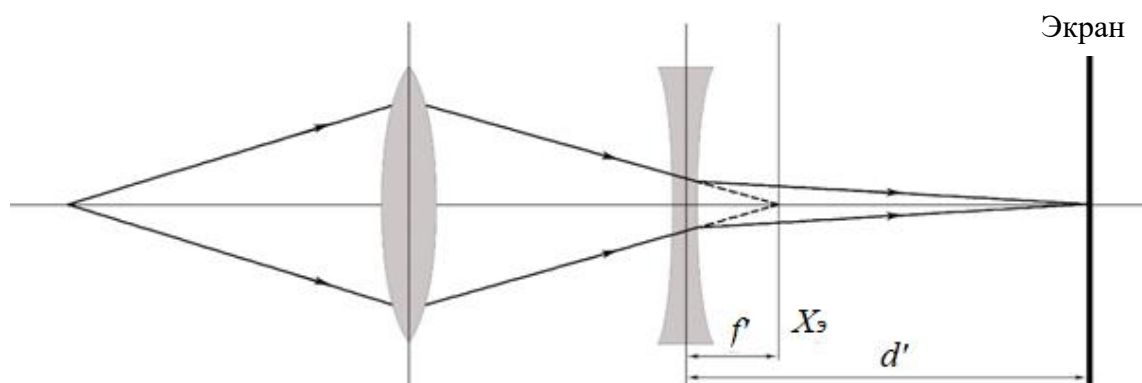


Рис. 3.9. Ход лучей в системе линз

10. Определить, пользуясь формулой (3.9) для рассеивающей линзы, главное фокусное расстояние собирающей линзы в каждом опыте (F') и найти среднее значение с погрешностью измерения.

Таблица 3.2

Результаты измерений для рассеивающей линзы

Но- мер п/п	d' , см	f' , см	F' , см	$(\bar{F}' - F'_i)^2$, см ²
1				
2				
3				
4				
5				
$\bar{F}' =$				$\sum (\bar{F}' - F'_i)^2 =$

11. Записать выводы. Провести сравнение фокусного расстояния для собирающей и рассеивающей линзы.

Вычисление погрешностей

1. Определить среднее арифметическое значение для фокусного расстояния для собирающей и рассеивающей линзы:

$$\bar{F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n F_i,$$

где N – число опытов.

2. Необходимо вычислить квадраты случайных отклонений $(\bar{F} - F_i)^2$ и записать их в таблицу.

3. Вычислить среднеквадратичное отклонение среднего арифметического:

$$S_{\bar{F}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{F} - F_i)^2}.$$

4. Определить коэффициент Стьюдента $t_{p,N}$ согласно выбранной доверительной вероятности p и числа опытов N в данной серии измерений (где $t_{p,N}=2,78$ для $N=5$ и $p=0,95$).

5. Вычислить случайную погрешность фокусного расстояния для собирающей и рассеивающей линзы по формуле:

$$\Delta_{\text{сл}} = t_{p,N} \cdot S_{\bar{F}}.$$

6. Рассчитать систематическую погрешность измерения:

$$\Delta_c = 2 \frac{d^2 + f^2}{(d+f)^2} \Delta_x \text{ – для собирающей линзы,}$$

$$\Delta_c = 2 \frac{d'^2 - f'^2}{(d'-f')^2} \Delta_x \text{ – для рассеивающей линзы,}$$

где Δ_x – погрешность измерения расстояний по миллиметровой шкале.

В качестве значений d, f, d' и f' – берем расстояние от предмета до линзы $d (d')$ и расстояние от линзы до экрана $f (f')$ для первого измерения в обоих случаях.

7. Вычислить полную погрешность:

$$\Delta_F = \sqrt{\Delta_c^2 + \Delta_{\text{сл}}^2}.$$

8. Записать окончательный результат для фокусного расстояния для собирающей и рассеивающей линзы в виде:

$$F = \bar{F} \pm \Delta_F,$$

$$F' = \bar{F}' \pm \Delta_{F'}.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение, что такое линза.
2. Какие виды линз бывают?
3. Дайте определение тонкой линзы.
4. Что такое фокус и фокальная плоскость?
5. Нарисуйте ход лучей, проходящих через собирающую линзу.
6. Нарисуйте ход лучей, проходящих через рассеивающую линзу.
7. Действительное и мнимое изображение.
8. Построение изображения в собирающей линзе.
9. Построение изображения в рассеивающей линзе.
10. Как определить оптическое увеличение линзы и системы линз?
11. Как вычислить линейное увеличение линзы?
12. Запишите уравнение тонкой линзы.

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ САХАРА ПРИ ПОМОЩИ ПОЛУТЕНЕВОГО ПОЛЯРИМЕТРА

Цель работы: изучение поляризации света и физических основ работы полутеневого поляриметра.

Краткая теория

Естественный и поляризованный свет

Световые волны являются поперечными, т. е. вектор напряженности электрического поля $\vec{E}$, вектор напряженности магнитного поля $\vec{H}$ и волновой вектор $\vec{k}$, определяющий направление распространения волны, взаимно перпендикулярны.

Поляризованным называется свет, в котором колебания вектора $\vec{E}$ упорядочены каким-либо образом. В естественном свете колебания происходят беспорядочно во всех направлениях. E

Рассмотрим два взаимно перпендикулярных колебания электрического вектора, совершающихся вдоль осей x и y и отличающихся по фазе на δ :

$$E_x = A_1 \cos \omega t, E_y = A_2 \cos(\omega t + \delta).$$

Результирующая напряженность $\vec{E}$ является векторной суммой $\vec{E}_x$ и $\vec{E}_y$ (рис. 4.1). Угол между направлениями векторов $\vec{E}$ и $\vec{E}_x$ определяется выражением:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{E_y}{E_x} = \frac{A_2 \cos(\omega t + \delta)}{A_1 \cos \omega t}.$$

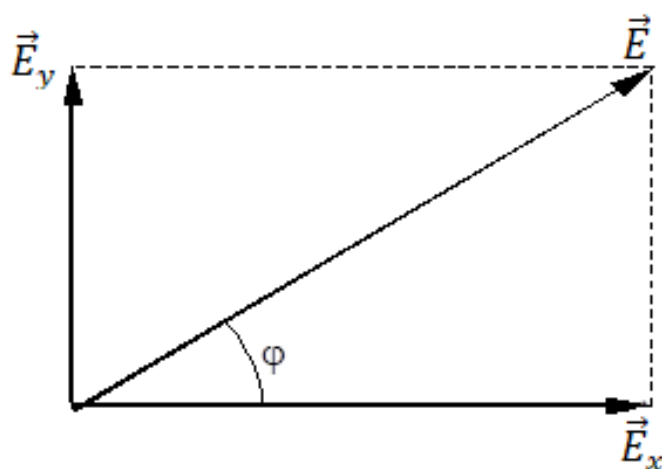


Рис. 4.1. Разложение вектора напряженности электрического поля
на составляющие по осям координат

Если разность фаз δ претерпевает случайные хаотические изменения, то и угол φ , определяющий направление вектора $\vec{E}$, будет испытывать постоянные неупорядоченные изменения. В соответствии с этим, естественный свет можно представить себе как наложение двух некогерентных волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях и имеющих одинаковую интенсивность.

Если компоненты световой волны $\vec{E}_x$ и $\vec{E}_y$ когерентны, т. е. δ имеет постоянное значение, свет будет поляризованным. Вид поляризации при этом зависит от величины δ . При $\delta = 0$ поляризация линейная, колебания вектора $\vec{E}'$ происходят в одной плоскости. При $\delta = \pi/2$ поляризация круговая, конец вектора $\vec{E}$ описывает окружность. При промежуточном значении δ поляризация эллиптическая, причем ориентация эллипса относительно осей координат x и y определяется значением δ (рис. 4.2).

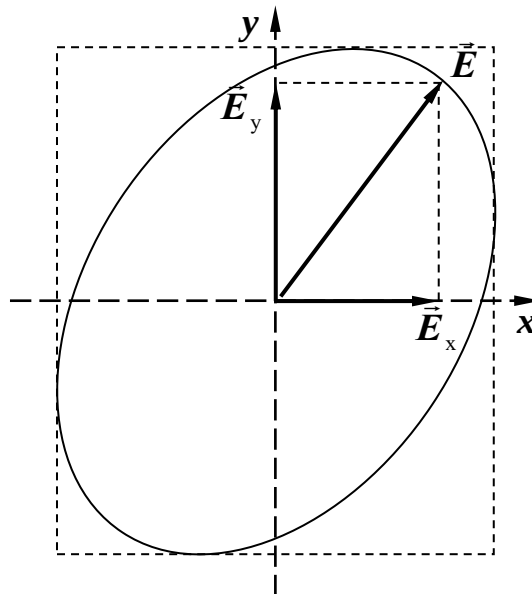


Рис. 4.2. Эллиптическая поляризация света

Если колебания вектора $\vec{E}$ происходят хаотически по всем направлениям, но при этом имеется преимущественное направление колебаний, свет является частично поляризованным.

Согласно новой терминологии, плоскость, в которой происходят колебания вектора $\vec{E}$, называют плоскостью поляризации линейно поляризованного света. Прежде эту плоскость называли плоскостью колебаний, а плоскостью поляризации – плоскостью, ей перпендикулярную, и такая терминология часто встречается в литературе.

Оптические явления в анизотропных средах.

Двойное лучепреломление

Это явление наблюдается при прохождении света через прозрачные кристаллы, не обладающие кубической симметрией. Оно заключается в том, что падающий луч разделяется внутри кристалла на два луча, распространяющихся с разными скоростями в различных направлениях.

Один луч подчиняется обычному закону преломления, т. е. показатель преломления этого луча не зависит от угла падения света. Такой луч называется обыкновенным (o). Показатель преломления для другого луча не является постоянным, а зависит от угла падения. Этот луч называется необыкновенным (e).

Даже при нормальном падении света на поверхность кристалла необыкновенный луч отклоняется от первоначального направления и не лежит в плоскости, проходящей через падающий луч и нормаль к поверхности кристалла (рис. 4.3).

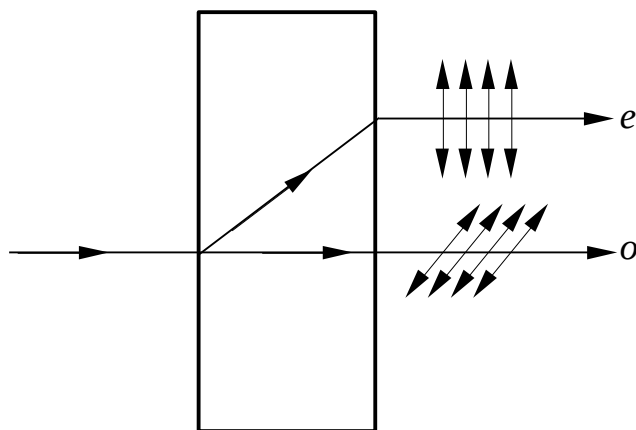


Рис. 4.3. Двойное лучепреломление при прохождении света в кристаллах

Впервые двойное лучепреломление наблюдалось при прохождении через кристаллы исландского шпата (разновидность кальцита, имеющего гексагональную структуру).

В каждом двоякопреломляющем кристалле есть по крайней мере одно направление, вдоль которого обыкновенный и необыкновенный лучи распространяются не разделяясь. Такое направление называется оптической осью кристалла. Кристаллы, имеющие одну оптическую ось, называются одноосными. Примером такого кристалла может служить упомянутый выше исландский шпат. В одноосных кристаллах наблюдаются обыкновенный и необыкновенный лучи. Существуют кристаллы, имеющие две оптических оси. Такие кристаллы называют двухосными. В них оба луча являются необыкновенными. Двухосными кристаллами являются, например, слюда или гипс.

Плоскость, проходящая через оптическую ось кристалла и падающий луч, называется главной плоскостью или главным сечением кристалла.

Опыт показывает, что обыкновенный и необыкновенный лучи являются линейно поляризованными во взаимно перпендикулярных направлениях. Обыкновенный луч поляризован перпендикулярно главной плоскости кристалла, плоскость поляризации необыкновенного луча совпадает с главной плоскостью.

Показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей различны, а это означает, что различны и скорости их распространения. Причем скорость распространения необыкновенного луча зависит от угла падения света на кристалл. Следовательно, причиной двойного лучепреломления является различие скоростей распространения света, поляризованного во взаимно перпендикулярных направлениях.

Явление двойного лучепреломления может применяться для получения и исследования поляризованного света.

Дихроизм

В некоторых кристаллах, обладающих двойным лучепреломлением, один из лучей поглощается сильнее другого. Это явление называется дихроизмом. В кристаллах турмалина, например, необыкновенный луч практически полностью поглощается, проходя расстояние 1 мм.

Вращение плоскости поляризации

Ряд веществ, например, кварц, обладают способностью поворачивать плоскость поляризации линейно поляризованного света, проходящего вдоль оптической оси кристалла. Такое явление называется вращением плоскости поляризации. Свойством вращать плоскость поляризации обладают также сахар, кинноварь, водный раствор сахара и сахаристых веществ, никотин, скипидар, винная кислота, нефть и др. Эти вещества называются оптически активными.

Вращение плоскости поляризации объясняется особенностями структуры оптически активных веществ: наличием анизотропных молекул, не имеющих ни центра симметрии, ни плоскости симметрии. В оптически активных кристаллах асимметричными являются элементарные ячейки.

Явление вращения плоскости поляризации может использоваться для определения и идентификации оптически активных веществ, для измерения их концентрации в растворах. Поляриметрические методы анализа и контроля ценны своей простотой и высокой точностью. Они применяются в минералогии, для анализа эфирных и минеральных масел, горных смол и т. д.

Для оптически активных кристаллов угол поворота плоскости поляризации равен: $\alpha = \alpha_0 l$, для чистых жидкостей: $\alpha = \alpha_0 \rho l$, для оптически активных растворов:

$$\alpha = \alpha_0 C \cdot l, \quad (4.1)$$

где ρ – плотность жидкости; l – расстояние, пройденное светом в оптически активном веществе (принято выражать в дм); C – концентрация оптически активного вещества в растворе (в г/см³).

Величина α_0 называется удельным вращением. Удельное вращение численно равно углу поворота плоскости поляризации света слоем оптически активного вещества единичной толщины (1 дм) и единичной концентрации (г/см³).

Удельное вращение зависит от природы вещества, температуры (для большинства веществ при повышении температуры на 1 °С оно уменьшается на 0,001 α_0), и длины волны света (обычно α_0 возрастает с ее уменьшением). Зависимость α_0 от длины волны света называется вращательной дисперсией.

В зависимости от направления вращения плоскости поляризации различают право- и левовращающие оптически активные вещества. Если смотреть навстречу лучу, то плоскость его поляризации поворачивается по часовой стрелке для правовращающих веществ и против часовой стрелки – для левовращающих. Одно и то же вещество в различных кристаллических состояниях может быть как правовращающим, так и левовращающим.

В данной работе определяется концентрация раствора сахара по результатам измерений угла поворота плоскости поляризации α , который измеряют с помощью поляриметра.

Выполнение работы

1. Необходимые приборы и материалы: полутеневого поляриметр, источник света, трубка для растворов ($l = 2$ дм), растворы сахара известной и неизвестной концентраций.

2. Устройство и принцип действия полутеневого поляриметра. Основными частями всякого поляризационного прибора являются поляризатор и анализатор. В качестве поляризатора и анализатора служат призмы Николя (николи).

Николь (рис. 4.4) представляет собой призму, вырезанную из кристалла исландского шпата по плоскости спайности. Длина продольных ребер призмы в 3,65 раза больше длины ребер основания. Основания кристаллов отшлифовываются таким образом, чтобы они составляли с боковыми ребрами угол 68° вместо 71° у естественного кристалла. После этого кристалл распиливается по диагональной плоскости, которая перпендикулярна боковым граням кристалла.

Обе половины полируются и склеиваются вдоль линии AB канадским бальзамом (смолистое прозрачное вещество с показателем преломления $n = 1,55$).

Кристалл исландского шпата, как и некоторые другие прозрачные кристаллы, обладает свойством двойного лучепреломления.

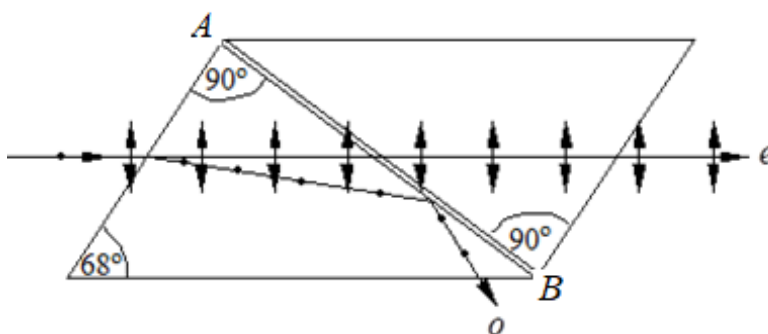


Рис. 4.4. Ход лучей в призме Николя

Естественный луч, падая на переднюю грань призмы, расщепляется на два луча – обыкновенный (o) и необыкновенный (e), которые линейно поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях, как показано на рис. 4.4. Угол падения луча на переднюю грань призмы Николя и углы между гранями призмы таковы, что необыкновенный луч проходит через призму практически без преломления, а угол падения обыкновенного луча на слой канадского бальзама больше или равен предельному, и он испытывает полное внутреннее отражение (показатель преломления обыкновенного луча исландским шпатом $n_o = 1,66$). На выходе обыкновенный луч поглощается зачерненной оправой призмы. Необыкновенный луч ($n_e = 1,51$) проходит сквозь слой канадского бальзама практически без преломления, лишь незначительно смещаясь.

На рис. 4.5 показан внешний вид поляриметра, а на рис. 4.6 – его оптическая схема.

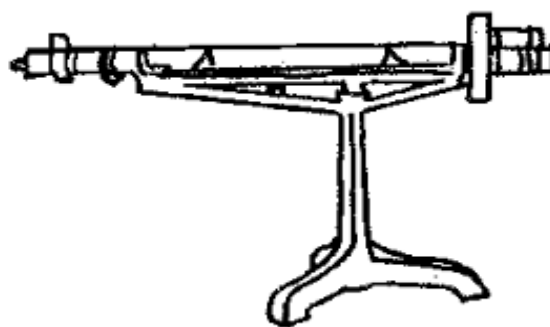


Рис. 4.5. Внешний вид поляриметра

Оптическая схема поляриметра состоит из источника света S , собирающей линзы L , поляризатора P , полутеневой пластинки B , кюветы (трубки) с исследуемым веществом C , компенсатора K , анализатора A и объектива O .

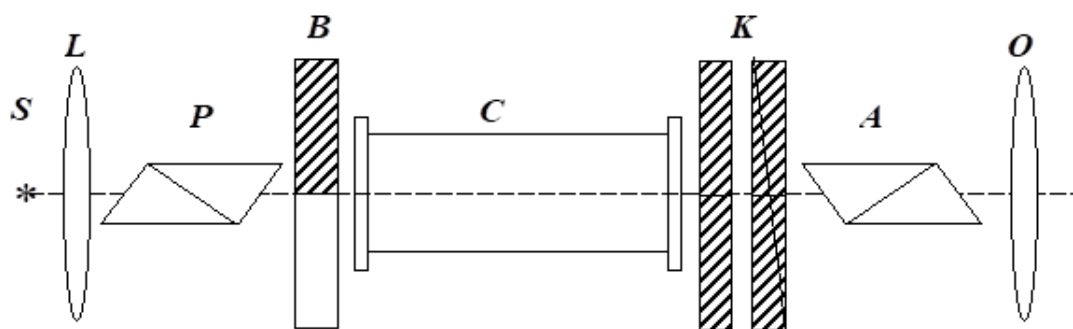


Рис. 4.6. Оптическая схема поляриметра

Линза L преобразует расходящийся пучок света в параллельный. Поляризатор P падающий свет превращает в линейно поляризованный. Полутеневая пластинка B делит поле зрения прибора на две половины и служит для повышения точности измерений угла поворота плоскости поляризации.

Полутеневая пластинка состоит из двух половин, стеклянной и кварцевой (рис. 4.7). Кварцевая пластинка вырезана параллельно оптической оси CC и имеет такую толщину, что разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей при распространении света перпендикулярно пластинке равна половине длины волны $\lambda/2$ для желтых лучей. Пусть на кварцевую пластинку падает из николя линейно поляризованный луч, колебания вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ в котором происходят в плоскости PP (рис. 4.7, a), составляющей малый угол $\varphi/2$ с CC . Его можно разложить на два компонента, колебания в которых перпендикулярны и параллельны оптической оси CC (вектора $\vec{E}_\perp$ и $\vec{E}_\parallel$ соответственно, рис. 4.7, b). Эти два компонента распространяются с разной скоростью и на выходе из пластинки будут иметь разность хода $\lambda/2$. Иначе говоря, колебания в одном из компонентов изменяют фазу на π и колебания происходят в противоположном направлении (вектор $\vec{E}_\perp'$, рис. 4.7, $в$). При их сложении на выходе из пластинки возникает луч, в котором колебания происходят в плоскости PP' (вектор $\vec{E}'$, рис. 4.7, $г$), составляющей угол $\varphi/2$ с CC .

Таким образом, в луче, прошедшем через стеклянную пластинку, колебания происходят в плоскости PP , а в луче, прошедшем через кварцевую пластинку – в плоскости PP' (рис. 4.7, $д$). Угол между плоскостями поляризации света в двух частях поля зрения равен φ .

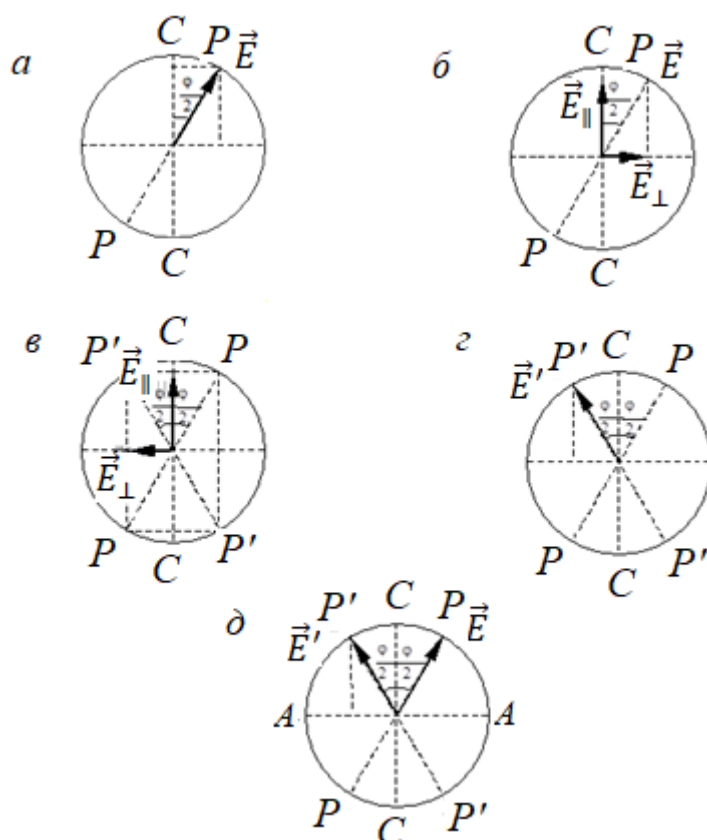


Рис. 4.7. Преобразование линейно поляризованного луча при прохождении через полутеневую пластинку

Если свет, прошедший через полутеневую пластинку, пропустить через анализатор A , плоскость поляризации которого AA перпендикулярна оптической оси CC , освещенность обеих половин поля зрения будет одинаковой (рис. 4.8). Если между поляризатором и анализатором находится правовращающее вещество, плоскости колебаний векторов $\vec{E}$ и $\vec{E}'$ поворачиваются на угол α (см. рис. 4.8), проекции векторов $\vec{E}$ и $\vec{E}'$ на плоскость анализатора становятся различными и освещенность двух половин поля зрения будет различной. Угол α является углом вращения плоскости поляризации.

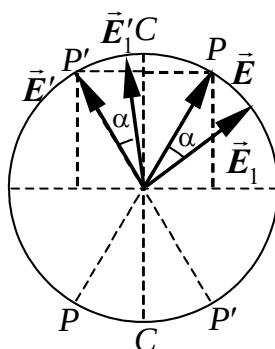


Рис. 4.8. Преобразование освещенностей двух половин поля зрения при прохождении света через правовращающее вещество

Для компенсации вращения перед анализатором помещается компенсатор (рис. 4.9), который состоит из двух пластинок кварца, правой и левой, установленных одна за другой. Пластинка правого кварца имеет постоянную толщину, тогда как пластинка левого кварца состоит из двух клиньев, которые могут скользить один по другому, благодаря чему можно изменять толщину левовращающей пластинки.

Если между поляризатором и анализатором нет вращающего раствора сахара, то клинья сдвинуты так, как это показано на рис. 4.9, *а*. При этом толщина право- и левовращающих пластинок одинакова, и их действие взаимно компенсируется. Чтобы скомпенсировать вращение плоскости поляризации, возникающее при прохождении света через правовращающий раствор сахара, клинья должны быть сдвинуты в положение *б*, а в случае левовращающего раствора – в положение *в*.

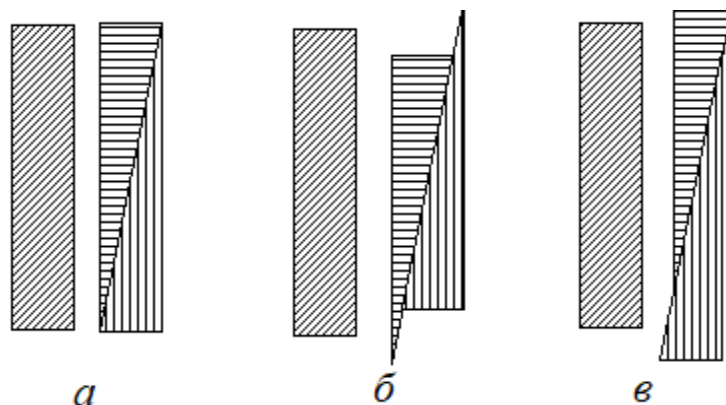


Рис. 4.9. Устройство компенсатора

С левовращающей пластинкой соединены шкала и винт. Вращением винта можно сдвигать клинья компенсатора и изменять толщину пластины. Это вызывает смещение шкалы, которую видит наблюдатель в окуляр поляриметра, вдоль неподвижного нониуса. Шкала имеет угловые деления, что позволяет непосредственно определять угол вращения плоскости поляризации. Нониус и основная шкала имеют нуль посередине.

В окуляре *О* видны две половинки поля зрения. При отсутствии вращающего вещества в трубке *С*, если компенсатор находится в положении *а*, ноль нониуса и основной шкалы совпадают (рис. 4.10). При этом обе половинки поля зрения имеют одинаковую освещенность.

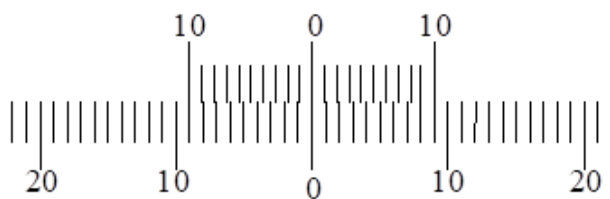


Рис. 4.10. Вид измерительной шкалы

При наличии в трубке вращающего вещества равенство освещенностей двух полей зрения нарушается. Вращением винта можно снова добиться равенства освещенностей. При этом вращение плоскости поляризации за счет вращающего вещества компенсируется компенсатором. Нуль основной шкалы смещается относительно нуля нониуса. Целое число градусов отсчитывается по основной шкале против нуля нониуса. Отсчеты вправо от нуля основной шкалы берутся со знаком плюс, влево – со знаком минус. Десятые доли градуса отсчитываются по нониусу обычным способом (деление, совпадающее с делением основной шкалы). Если нуль нониуса смещен в положительную часть основной шкалы, для нахождения десятых долей градуса используется правая часть нониуса, если он смещен в отрицательную часть основной шкалы, используется левая часть нониуса.

Например, на рис. 4.11, *а* отсчет равен минус 29,4°, а на рис. 4.11, *б* отсчет – плюс 7,8°.

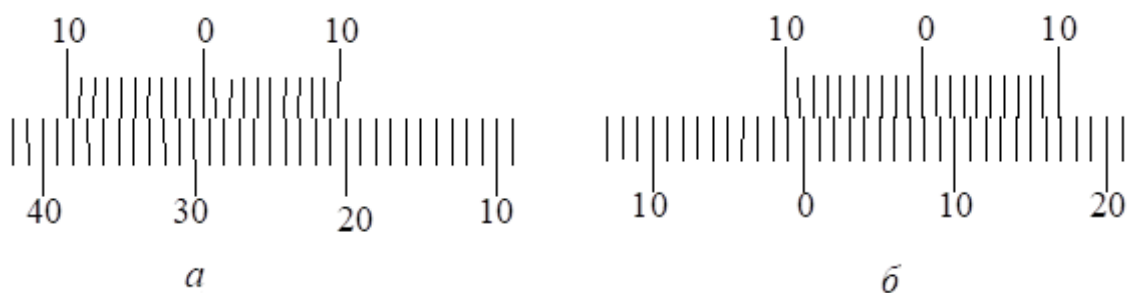


Рис. 4.11. Отсчеты по шкале нониуса

Порядок проведения измерений

1. Определить нулевую точку прибора. Для этого вынуть из прибора трубку для раствора, включить источник света и сфокусировать нижний окуляр так, чтобы четко была видна граница раздела половин поля зрения. Опыт рекомендуется производить в темноте. Винтом компенсатор установить так, чтобы обе половинки поля зрения были одинаково максимально затемнены. По шкале определить значение нулевой точки прибора. При хорошей настройке нуль основной шкалы и нуль нониуса должны совпадать.

2. Внутри прибора поместить трубку с раствором сахара известной концентрации C . Трубку следует наполнять так, чтобы в ней не оставалось пузырьков воздуха. Равенство освещенностей двух половин поля зрения нарушается, так как раствор поворачивает плоскость поляризации на некоторый угол α . Вращая винт компенсатора, добейтесь равенства освещенностей. Произвести отсчет по шкале с учетом нулевой точки. Отсчет производить пять раз.

3. Аналогично измерить углы вращения плоскости поляризации α_{x_1} и α_{x_2} для двух растворов неизвестных концентраций C_{x_1} и C_{x_2} .

4. Найти удельное вращение α_0 по данным измерений для раствора сахара известной концентрации:

$$\alpha_0 = \frac{\bar{\alpha}}{C \cdot l},$$

где $\bar{\alpha}$ – среднее значение угла α ; C – концентрация раствора; l – длина трубки.

5. Вычислить неизвестные концентрации растворов и посчитать их погрешности измерений:

$$C_x = \frac{\alpha_x}{\alpha_0 \cdot l}.$$

Результаты измерений занесите в табл. 4.1

Таблица 4.1

Результаты измерений

Номер п/п	α , град	α_0 , $\frac{\text{град}}{\text{дм} \cdot \%}$	α_{x1} , град	C_{x1} , %	$(\bar{C}_{x1} - C_{x1i})^2$, %	α_{x2} , град	C_{x2} , %	$(\bar{C}_{x2} - C_{x2i})^2$, %
1								
2								
3								
4								
5								
$\bar{C}_{x1} = \quad \sum_{i=0}^n (\bar{C}_{x1} - C_{x1i})^2 = \quad \bar{C}_{x2} = \quad \sum_{i=0}^n (\bar{C}_{x2} - C_{x2i})^2 =$								

Вычисление погрешностей

1. Определить среднее арифметическое значение для концентраций растворов:

$$\bar{C}_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n C_{xi},$$

где N – число опытов.

2. Необходимо вычислить квадраты случайных отклонений $(\bar{C}_x - C_{xi})^2$ и записать их в таблицу.

3. Вычислить среднеквадратичное отклонение среднего арифметического:

$$S_{\bar{C}_x} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=0}^n (\bar{C}_x - C_{xi})^2}.$$

4. Определить коэффициент Стьюдента $t_{p,N}$ согласно выбранной доверительной вероятности p и числа опытов N в данной серии измерений (где $t_{p,N}=2,78$ для $N=5$ и $p=0,95$).

5. Вычислить случайную погрешность для концентраций растворов по формуле:

$$\Delta_{C_x} = t_{p,N} \cdot S_{\overline{C_x}}.$$

6. Записать окончательный результат для неизвестных концентраций растворов в виде:

$$C_x = \overline{C_x} \pm \Delta_{C_x}.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Чем отличается поляризованный свет от естественного света?
2. Какие вещества называются «оптически активными»? Перечислите разновидности оптически активных веществ.
3. Что называется «удельным вращением»? От чего зависит эта величина? Запишите формулу для определения удельного вращения.
4. Нарисуйте оптическую схему полутеневого поляриметра. Перечислите основные его части и объясните их назначение.
5. Расскажите о назначении и устройстве призмы Николя.
6. Опишите устройство и принцип действия кварцевого компенсатора.
7. Расскажите о порядке измерения углов плоскости поляризации в данной работе.
8. Опишите порядок определения удельного вращения раствора сахара в данной работе.
9. Приведите примеры применения явления вращения плоскости поляризации.
10. Задача. Пластика кварца, вырезанная параллельно оптической оси кристалла, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света. Определите толщину кварцевой пластики, если свет полностью поглощается при помещении этой пластики между двумя николями, плоскости которых параллельны. Удельное вращение кварца при данной длине волны света равно 200 град/см. Ответ: 0,45 см.

Лабораторная работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: *изучение дифракции на одной щели и дифракционной картины на экране наблюдения.*

Краткая теория

Общие сведения о дифракции

Дифракцией называется совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями (т. е. при распространении света через малые отверстия, вблизи границ непрозрачных экранов и т. п.) и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики, например, от закона прямолинейного распространения света.

Дифракция происходит во всех случаях, когда изменение амплитуды или фазы световой волны не одинаково на поверхности волнового фронта. Поэтому это явление возникает при любом (амплитудном или фазовом) локальном нарушении волнового фронта. В результате дифракция приводит к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени.

Дифракция, как и интерференция, служит *доказательством волновой природы света*. В большинстве случаев дифракция достаточно точно и просто моделируется на основе принципа Гюйгенса-Френеля: *каждая точка, до которой доходит волна, является источником вторичных волн, а огибающая этих волн дает положение волнового фронта в последующий момент времени*. Геометрическое место точек, до которых доходят колебания в некоторый момент времени, называется *волновым фронтом*.

Различают два случая дифракции в зависимости от расстояний между источником света и экраном (точкой наблюдения) до препятствия, расположенного на пути распространения света.

Дифракция Френеля, или дифракция в *сходящихся пучках*, получается, когда на препятствие падает сферическая или плоская волна, а экран наблюдения дифракционной картины находится на конечном от препятствия расстоянии. Дифракционную картину Френеля достаточно просто объяснить на основе метода зон Френеля.

Дифракция Фраунгофера или *дифракция в параллельных пучках* получается:

1) когда на препятствие падает плоская волна, а экран наблюдения дифракционной картины находится в фокальной плоскости собирающей линзы, установленной за препятствием;

2) если источник света и экран наблюдения расположены от препятствия настолько далеко, что лучи, падающие на препятствие, и лучи, идущие в точку

наблюдения, образуют практически параллельные пучки. Между дифракцией Френеля и Фраунгофера нет принципиальной разницы, одна непрерывно переходит в другую.

Критерии наличия дифракции или ее отсутствия определяются через соотношения:

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

$$\frac{b^2}{l\lambda} \approx 1 - \text{дифракция Френеля:}$$

$$\frac{b^2}{l\lambda} \gg 1 - \text{геометрическая оптика,}$$

где λ – длина волны света; b – характерный размер препятствия; l – расстояние от препятствия до экрана.

Дифракции Фраунгофера на одной щели

Практически для наблюдения дифракции Фраунгофера точечный источник помещают в фокусе собирающей линзы и полученный при этом параллельный пучок света направляют на препятствие (дифракция на щели). Дифракционную картину наблюдают в фокальной плоскости другой собирающей линзы, поставленной на пути дифрагированного света.

Для изучения дифракции Фраунгофера в качестве источника света удобно использовать лазер. Лазерное излучение отличается малой расходимостью, высокой когерентностью, высокой степенью монохроматичности и значительной интенсивностью. В этом случае отпадает необходимость в первой линзе, при этом экран располагают в фокальной плоскости второй линзы. Лазерный пучок направляется на преграду, а дифрагированные в различных направлениях волны дают дифракционную картину, наблюдаемую на экране.

Распределение интенсивности света при дифракции Фраунгофера можно найти с помощью принципа Гюйгенса – Френеля. Интенсивность в определенной точке P фокальной плоскости объектива линзы обусловлена интерференцией вторичных волн, исходящих от всех элементарных участков отверстия щели и распространяющихся в одном и том же направлении, задаваемом углом φ .

Ограничимся рассмотрением малых углов φ (рис. 5.1), так как лишь волны, дифрагировавшие на малые углы, будут иметь заметную интенсивность.

Рассмотрим случай (простой, но практически важный), когда отверстие в экране имеет вид узкой длинной щели с параллельными краями и шириной b (см. рис. 5.1). Элементарные участки волнового фронта в форме узких длинных полосок, параллельных краям щели, становятся источниками вторичных волн.

Разобьем волновую поверхность в щели (см. рис. 5.1) на маленькие участки dx , каждый из них в точке P создает колебание:

$$dE = E_0 \cos(\omega t - k\Delta) dx, \quad (5.1)$$

где $\Delta = x \sin \varphi$; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число.

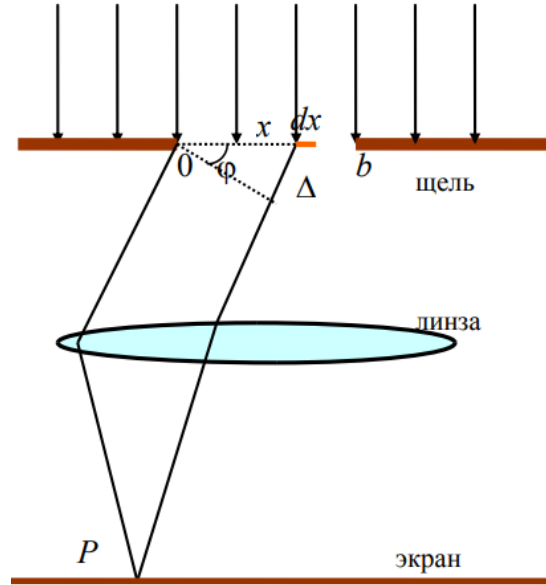


Рис. 5.1. Дифракции Фраунгофера на щели

Учтем полную амплитуду волны, проходящей в щель. Вклад от кусочка dx во входящую амплитуду равен: $dA = E_0 dx$. Тогда от всей щели вклад в амплитуду равен:

$$A_0 = \int dA = \int_0^b E_0 dx = E_0 b,$$

откуда имеем

$$E_0 = \frac{A_0}{b}. \quad (5.2)$$

Поэтому, используя выражение (5.1), можно записать:

$$dE = \frac{A_0}{b} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \varphi\right) dx. \quad (5.3)$$

Тогда вклад от всей щели в направлении, определяемым углом φ , равен:

$$E = \frac{A_0}{b} \int_0^b \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \varphi\right) dx = \frac{A_0}{b} \left(-\frac{\lambda}{2\pi \sin \varphi}\right) \left[\sin\left(\omega t - \frac{2\pi b}{\lambda} \sin \varphi\right) - \sin \omega t\right] = A_0 \frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi} \cos\left(\omega t - \frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi\right). \quad (5.4)$$

При этом использовали тригонометрическое соотношение:

$$\sin \alpha - \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha - \beta}{2} \cos \frac{\alpha + \beta}{2}. \quad (5.5)$$

Итак, полная амплитуда под углом φ :

$$E_{\varphi} = E_0 b \frac{\sin(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda})}{\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}}. \quad (5.6)$$

Переходя от напряженности светового поля к интенсивности света и учитывая, что $I \approx E^2$, получаем:

$$I_{\varphi} = I_0 \left(\frac{\sin(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda})}{\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}} \right)^2, \quad (5.7)$$

где I_0 – интенсивность в середине дифракционной картины.

При угле дифракции $\varphi = 0$ колебания от всех элементарных зон приходят в точку $\chi = 0$ экрана в одинаковой фазе. Поэтому амплитуда результирующего колебания равна алгебраической сумме амплитуд складываемых колебаний. При этом будет наблюдаться наиболее интенсивный центральный максимум (рис. 5.2).

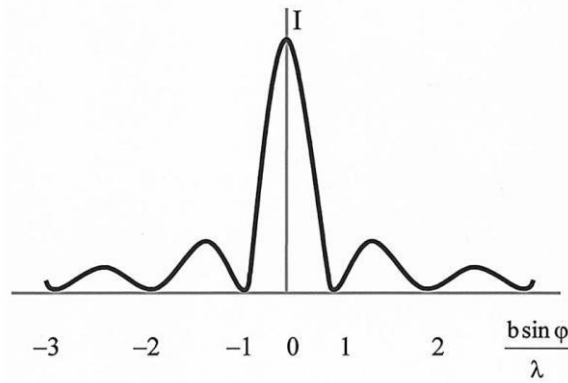


Рис. 5.2. Угловое распределение интенсивности дифрагировавшего света

Существуют направления, в которых интенсивность обращается в ноль. Соответствующие им углы дифракции находятся из соотношения

$$\sin \varphi = m \frac{\lambda}{b}, \quad (5.8)$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ – порядок минимума.

Между минимумами находятся побочные максимумы, величины которых невелики. Отношение интенсивностей центрального и двух первых максимумов равно $I_0 : I_1 : I_2 = 1000 : 47 : 17$. Таким образом, можно считать, что основной световой поток (свыше 90 %) сконцентрирован в пределах, определяемых значениями $\sin \varphi = \pm \frac{\lambda}{b}$.

Уменьшение размеров щели приводит к тому, что ширина центрального максимума становится больше. При ширине щели $b = \lambda$ экран будет освещен весь, больше в середине и меньше по краям. Наоборот, чем щель шире, тем дифракционная картина ярче, ширина дифракционных полос меньше, а их яркость больше.

Дифракционная картина симметрична относительно центра, так как из формулы (5.7) получается, что $I_{-\varphi} = I_{\varphi}$. При смещении щели параллельно

экрану дифракционная картина, наблюдаемая на экране, остается неподвижной (ее середина лежит напротив центра).

При малых углах дифракции координаты дифракционных минимумов или максимумов на экране будут равны:

$$\chi = F \tan \varphi \approx F \sin \varphi, \quad (5.9)$$

где F – фокусное расстояние линзы.

Из (5.8) следует, что координаты дифракционных минимумов определяются как

$$\chi_{\min} = m \frac{\lambda}{b} F. \quad (5.10)$$

Побочные максимумы лежат приблизительно посередине между минимумами. Тогда можно записать:

$$\chi_{\max} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{b} F. \quad (5.11)$$

Расстояние между дифракционными максимумами, ограниченными минимумами m -го порядка, равно

$$\Delta\chi = 2\chi_{\min} = 2m \frac{\lambda}{b} F. \quad (5.12)$$

При больших расстояниях L от щели до экрана суперпозиция параллельных дифрагированных лучей осуществляется на экране и без собирающей линзы, и в выражении (5.10) ÷ (5.12) вместо F можно поставить L .

Так как $\sin \varphi \leq 1$, то из формулы (5.8) следует, что дифракционный максимум порядка m может наблюдаться только при ширине щели $b \geq m\lambda$. При ширине щели $b \gg \lambda$ дифракция становится слабо выраженной и на экране наблюдается геометрическое изображение щели.

Необходимые приборы и материалы

Оборудование лабораторной работы предназначено для исследования явления дифракции света от одной щели, в частности, определение ширины щели.

Стенд позволяет наблюдать дифракционную картину на экране, определить интенсивности максимумов и минимумов дифракционной картины (рис. 5.4).

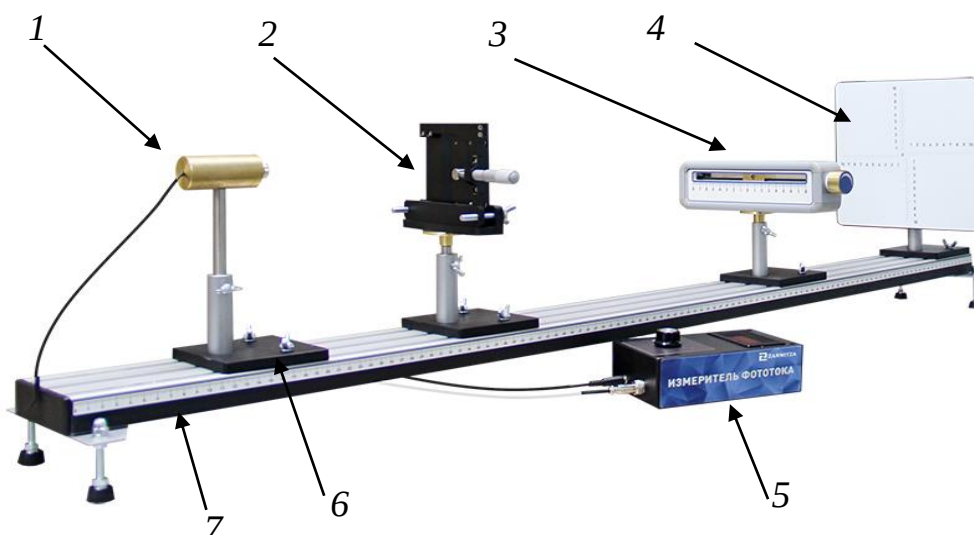


Рис. 5.4. Состав оборудования для лабораторной работы:

- 1 – с полупроводниковый лазер; 2 – щель с регулируемой шириной в держателе;
 3 – модуль фотоприемника; 4 – экран с миллиметровой шкалой;
 5 – измеритель фототока; 6 – рейтеры; 7 – оптическая скамья

ВНИМАНИЕ! Запрещается трогать руками оптические поверхности источника света и экрана. Не допускать попадание лазерного излучения в глаза. Все перемещения вдоль оптической скамьи следует производить двигая приборы за металлические рейтеры.

Порядок выполнения работы. Часть 1

1. Разместить металлические рейтеры с лазером на одном конце оптической скамьи. Экран зафиксировать на расстоянии 10-15 см от края другого конца оптической скамьи. Включить в сеть 220 В блок питания полупроводникового лазера. Установить рейтер с регулируемой щелью как можно ближе к лазеру. Установить щель перпендикулярно лучу. Если лазерный луч не попадает в центр щели, открутить винтами держатель, установить щель по центру хода луча и закрутить винты обратно. Измерить расстояние от щели до экрана наблюдения L (рис. 5.5). Записать результат в табл. 5.1.

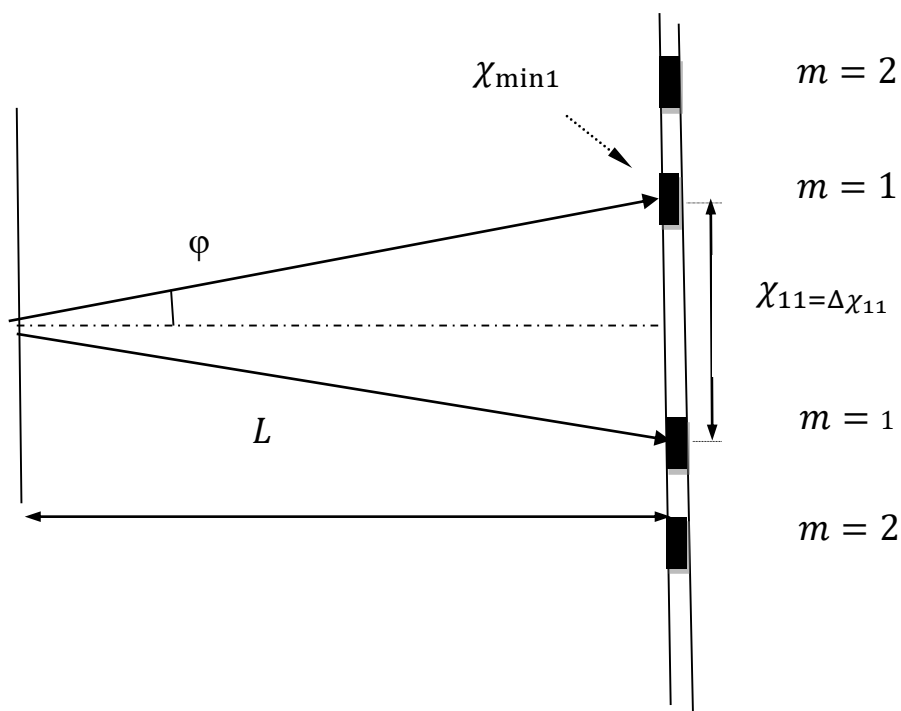


Рис. 5.5. Дифракционная картина на экране

Вращая ручку микromетра, установить некоторую ширину щели таким образом, чтобы на экране появилась четкая дифракционная картина. Поворотом стойки лазера поместить центральный максимум дифракционной картины в центр экрана.

2. Измерить по шкале на экране расстояние $\Delta\chi$ между минимумами m -го порядка, расположенными по обе стороны от центрального максимума. Цена деления линейки на экране 1 мм. Повторить измерения расстояния между минимумами три раза. Провести измерения для 1, 2 и 3 минимумов.

3. Занести результаты измерений и рассчитанные $\chi_{\min}$ трех порядков в табл. 5.1.

$$\chi_{\min} = \frac{\Delta\chi_{\min i \text{ ср.}}}{2}.$$

4. Для более точного определения ширины щели переместить экран на конец оптической скамьи и провести эксперимент повторно. Положение щели и ее размер должны оставаться неизменными. Результаты занести в табл. 5.1.

5. Выключить лазер.

6. Произвести расчеты. Определить значение ширины щели b , используя формулу (5.13), и записать результаты расчетов в табл. 5.1. Принять $\lambda = 635$ нм.

$$b = \frac{m\lambda}{\chi_{\min}} L. \quad (5.13)$$

7. Оценить погрешность измерения ширины щели. Рассчитать среднее значение ширины щели.

Таблица 5.1

Результаты измерений

	Номер минимума	$\Delta\chi_{\min i}, \text{ мм}$			$\chi_{\min}, \text{ мм}$	$b_i, \text{ мм}$	$(\bar{b} - b_i)^2, \text{ мм}^2$
		1	2	3			
$L_1, \text{ мм}$	1						
	2						
	3						
$L_2, \text{ мм}$	1						
	2						
	3						
$\bar{b} =$					$\sum_{i=0}^n (\bar{b} - b_i)^2 =$		

Вычисление погрешностей

1. Определить среднее арифметическое значение для ширины щели:

$$\bar{b} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n b_i,$$

где N – число опытов.

2. Необходимо вычислить квадраты случайных отклонений $(\bar{b} - b_i)^2$ и записать их в таблицу.

3. Вычислить среднеквадратичное отклонение среднего арифметического:

$$S_{\bar{b}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=0}^n (\bar{b} - b_i)^2}.$$

4. Определить коэффициент Стьюдента $t_{p,N}$ согласно выбранной доверительной вероятности p и числа опытов N в данной серии измерений (где $t_{p,N}=2,57$ для $N=6$ и $p=0,95$).

5. Вычислить случайную погрешность ширины щели по формуле:

$$\Delta_{\text{сл}} = t_{p,N} \cdot S_{\bar{b}}.$$

6. Рассчитать систематическую погрешность ширины щели:

$$\Delta_c = b \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta_x}{\chi_{\min}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2},$$

где Δ_x и ΔL – погрешности измерения расстояний. Для $\chi_{\min}$ и L возьмите минимальное значение из табл. 5.1.

7. Вычислить полную погрешность:

$$\Delta_b = \sqrt{\Delta_c^2 + \Delta_{\text{сл}}^2}.$$

8. Записать окончательный результат для фокусного расстояния для собирающей и рассеивающей линзы в виде:

$$b = \bar{b} \pm \Delta_b.$$

Порядок выполнения работы. Часть 2

1. Заменить рейтер с экраном на рейтер с фотоприемником.
2. Подключить фотоприемник к измерителю фототока. Включить измеритель фототока. При измерении фототока использовать только регуляторы с индикацией 2 мА (20 мА и 0,2 мА не используются).

ВНИМАНИЕ. Не подключайте измеритель фототока к сети без подключенного к нему фотоприемника.

Поперечным перемещением фотоприемника подвести его входное окно к центру дифракционной картины. Записать в табл. 5.2 значение координаты по линейке фотоприемника, соответствующее центру его окна.

3. Перекрыть луч лазера у его выходного отверстия и измерить фоновый ток. Записать полученные значения:

Фоновый фототок $I_0 =$

4. С помощью винтовой рукоятки сместить фотоприемник вправо на 1 мм, ориентируясь на шкалу линейки фотоприемника. В табл. 5.2 записать координату и соответствующую ей показания микроамперметра. Прodelать аналогичные действия, смещаясь вправо вдоль дифракционной картины на каждые следующие 1 мм. Необходимо снять зависимость показаний тока I_i микроамперметра от координаты фотоприемника χ_i . Полученные результаты записать в табл. 5.2.

Сместить окно фотоприемника на 15-20 мм.

Таблица 5.2

Результаты измерений

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
χ_i , мм																				
I_i , мкА																				
$I_i - I_0$, мкА																				
$-\chi_i$, мм																				
I_i , мкА																				
$I_i - I_0$, мкА																				

5. Повторить измерения п. 4, смещая фотоприемник в противоположную сторону. Координаты по линейке фотоприемника записывать со знаком «-». Полученные результаты записать в табл. 5.2.

6. Измерить расстояние L от щели до фотоприемника. Записать полученный результат (рис. 5.5)

$$L =$$

7. При расчетах считать $\lambda=635\text{нм}$ – длина волны монохроматического излучения лазера.

8. По результатам измерений по п.п 4 и 5 и табл. 5.2 построить график зависимости фототока $(I - I_0)$ от положения координаты фотоприемника χ_i .

9. Так как разность $(I - I_0)$ пропорциональна интенсивности падающего света, то полученный график дает распределение интенсивности света в дифракционном спектре (см. рис. 5.2).

10. По построенному графику, выполненному в соответствии с п. 8, или данных из табл. 5.2, определить ширину щели b . Для этого найти координаты минимумов. Зная расстояние между ними – χ_{ii} – и величину L , можно найти угол дифракции φ :

$$\text{tg}\varphi_i = \frac{\chi_{ii}}{2L}. \quad (5.14)$$

Ввиду малости угла φ :

$$\text{tg}\varphi_i = \sin \varphi_i \approx \varphi_i . \quad (5.15)$$

Так как $b \sin \varphi = \lambda m$, то получим следующую формулу:

$$b_i = \frac{\lambda m_i}{\sin \varphi_i} \approx \frac{\lambda m_i}{\varphi_i} = \frac{2L}{\chi_{ii}} \lambda m_i. \quad (5.16)$$

11. На основании формулы (5.16) следует рассчитать ширину щели для первых трех минимумов. Результаты записать в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Результаты измерений

Номер минимумов интенсивности, m_i	χ_{ii} , мм	b_i , мм	$(\bar{b} - b_i)^2$, мм ²
1			
2			
3			
		$\bar{b} =$	$\sum_{i=0}^n (\bar{b} - b_i)^2 =$

12. Оценить погрешность измерения ширины щели. Рассчитать среднее значение ширины щели. Записать результат.

Вычисление погрешностей

1. Определить среднее арифметическое значение для ширины щели:

$$\bar{b} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n b_i,$$

где N – число опытов.

2. Необходимо вычислить квадраты случайных отклонений $(\bar{b} - b_i)^2$ и записать их в таблицу.

3. Вычислить среднеквадратичное отклонение среднего арифметического:

$$S_{\bar{b}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{b} - b_i)^2}.$$

4. Определить коэффициент Стьюдента $t_{p,N}$ согласно выбранной доверительной вероятности p и числа опытов N в данной серии измерений (где $t_{p,N}=4,3$ для $N=3$ и $p=0,95$).

5. Вычислить случайную погрешность ширины щели по формуле:

$$\Delta_{сл} = t_{p,N} \cdot S_{\bar{b}}.$$

6. Рассчитать систематическую погрешность ширины щели:

$$\Delta_c = b \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta_x}{\chi_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2},$$

где Δ_x и ΔL – погрешности измерения расстояний. Для χ_i возьмите минимальное значение из табл. 5.2.

7. Вычислить полную погрешность:

$$\Delta_b = \sqrt{\Delta_c^2 + \Delta_{сл}^2}.$$

8. Записать окончательный результат для фокусного расстояния для собирающей и рассеивающей линзы в виде:

$$b = \bar{b} \pm \Delta_b.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление дифракции света?
2. Что такое «волновой фронт»?
3. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля для описания дифракции.
4. Когда (при каких условиях) наблюдается дифракция Фраунгофера?
5. Какой вид имеет дифракционная картина при дифракции Фраунгофера на щели?

6. Опишите дифракцию от одной щели.
7. Чем отличается дифракция Френеля от дифракции Фраунгофера?
8. Как изменится дифракционная картина при изменении ширины щели и длины волны света?
9. Какому уравнению подчиняется угол дифракции света на щели для максимумов и минимумов?
10. Как определить наибольший порядок максимума при дифракции света на щели?

Лабораторная работа № 6

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА В ОПЫТЕ ЮНГА

Цель работы: *исследование интерференционной картины в опыте Юнга и измерение ее характеристик.*

Краткая теория

Под интерференцией света понимают пространственное перераспределение энергии при суперпозиции электромагнитных волн видимого диапазона. Необходимым условием интерференции любых волн является их когерентность. Когерентность – это согласованность в протекании колебательных процессов. Необходимая согласованность заключается, прежде всего, в постоянстве разности фаз, приходящих в данную точку пространства.

Из-за монохроматичности обычных источников света это условие не выполняемо для волн, испускаемых двумя независимыми источниками. Поэтому обычно для получения когерентных световых волн при наблюдении двухлучевой интерференции поступают следующим образом: световой пучок от одного источника разделяют на два пучка, «идущих» разными путями в одну и ту же область пространства, где и наблюдается интерференция.

Различают два основных метода получения интерферирующих пучков: метод деления волнового фронта и метод деления амплитуды. Из-за малости длин волн видимого света и требований пространственной когерентности наблюдение интерференции света методом деления волнового фронта сопряжено с определенными сложностями.

Пространственная когерентность связана с разбросом направлений волнового вектора и определяется радиусом когерентности. Радиус когерентности – максимальное поперечное направлению распространения волны расстояние, на котором возможно проявление интерференции. Радиус когерентности $r_{\text{ког}} \sim \lambda / \varphi$, где λ – длина волны света, а φ – угловой размер источника.

Угловой размер Солнца на Земле $\varphi \sim 10^{-2}$ рад, длина волны видимого света $\lambda \sim 10^{-7}$ м, радиус когерентности для солнечных лучей $r_{\text{ког}} \sim 0,01$ мм. При таком малом радиусе когерентности невозможно непосредственно наблюдать интерференцию солнечных лучей, поскольку разрешающая способность человеческого глаза на расстоянии наилучшего зрения составляет лишь 0,1 мм.

Юнг предварительно пропускал солнечные лучи через очень малое отверстие в непрозрачном экране и смог наблюдать их интерференцию, поскольку уменьшался угловой размер источника света и увеличивался радиус когерентности.

Пространственная когерентность излучения лазера наблюдается во всем поперечном сечении светового пучка. Это позволяет детально изучить интерференционную картину в опыте Юнга. Для увеличения яркости картины вместо точечных отверстий используются узкие длинные параллельные друг другу щели.

Монохроматическое световое излучение лазера с длиной волны λ падает на непрозрачный экран с двумя щелями $Щ$, которые играют роль когерентных источников. Они испускают две интерферирующие световые волны. Интерференционная картина наблюдается на экране $Э$, расположенном на некотором расстоянии от щелей. Она имеет вид чередующихся светлых и темных полос (рис. 6.1).

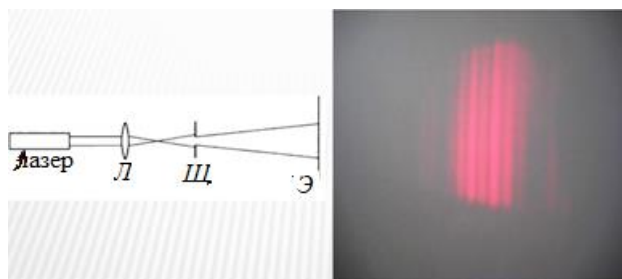


Рис. 6.1. Схема опыта

Рассчитаем положение полос и их ширину. На рис. 6.2 изображен ход интерферирующих лучей от когерентных источников-щелей S_1 и S_2 до точки наблюдения P на экране $Э$. Ось y проведем в плоскости экрана из центра интерференционной картины. Колебания происходят с одинаковой частотой, разность фаз колебаний равна нулю. Обозначим: d — расстояние между щелями; L — расстояние от щелей до плоскости экрана $Э$, причем $L \ll d$; r_1 и r_2 — расстояния от щелей S_1 и S_2 до точки P .

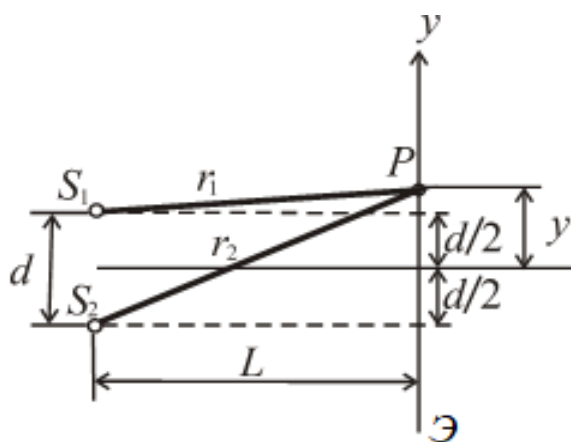


Рис. 6.2. Интерференционная схема Юнга

Проведем перпендикуляры из S_1 и S_2 к оси y (штриховые линии) и по теореме Пифагора получим:

$$r_1^2 = L^2 + \left(y - \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$r_2^2 = L^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2.$$

Вычтем из первого уравнения второе:

$$r_2^2 - r_1^2 = (r_2 - r_1)(r_2 + r_1) = L^2 + \left(y - \frac{d}{2}\right)^2 - L^2 - \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 = 2yd.$$

Оптическая разность хода равна

$$\Delta = n(r_2 - r_1) = n \frac{2yd}{(r_2 + r_1)},$$

где n – показатель преломления.

Так как $L \gg d$, то $r_1 + r_2 = 2L$.

Тогда, полагая $n=1$, получаем:

$$\Delta = yd/L.$$

Максимумы интенсивности света будут наблюдаться при значениях $\Delta = \pm m\lambda$ в точках экрана с координатами

$$y_{\max} = \pm m \frac{L}{d} \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

Минимумы интенсивности света будут наблюдаться при значениях $\Delta = \pm (2m+1)\lambda/2$ в точках экрана с координатами

$$y_{\max} = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{L}{d} \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

Расстояние между двумя соседними максимумами называется *расстоянием между интерференционными полосами*, а расстояние между соседними минимумами – *шириной интерференционной полосы*. Эти расстояния имеют одинаковое значение, равное $u = L\lambda/d$.

Измерив ширину интерференционной полосы u , можно рассчитать расстояние между щелями d :

$$d = L\lambda/u. \quad (6.1)$$

Необходимые приборы и материалы

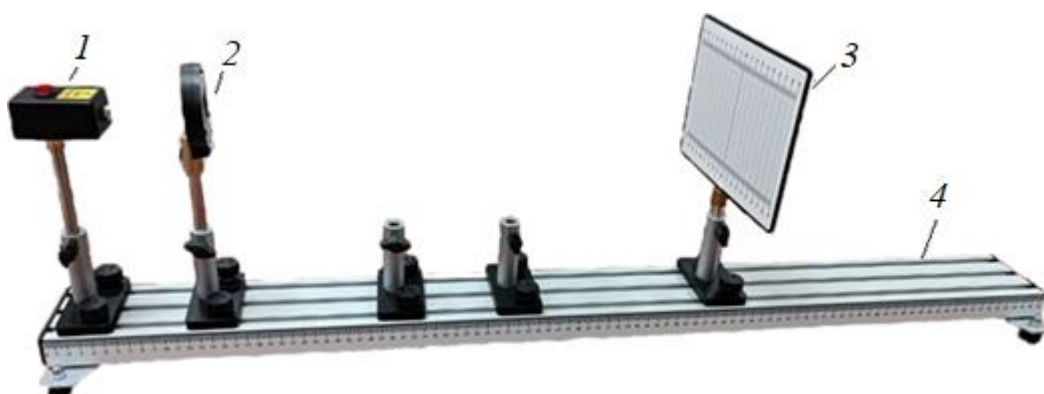


Рис. 6.3. Лабораторный стенд:

1 – лазер; 2 – экран Юнга; 3 – мерный экран; 4 – оптическая скамья

Установка (рис. 6.3) включает в себя оптическую скамью со стойками источника когерентного излучения (лазера) (длина волны $\lambda = 650$ нм), экран Юнга и мерный экран, обеспечивающие установку оптических элементов в требуемой конфигурации.

Порядок выполнения работы

1. Необходимо включить лазер и, вращая коллиматор, добиться того, чтобы лазерный луч имел минимальный диаметр. При этом центры луча лазера, экрана Юнга и мерного экрана должны находиться на одной оси. Если соосность достигнута, то на мерном экране должна появиться интерференционная картина, имеющая вид чередующихся темных и светлых полос.

2. Ширину интерференционной полосы измерять следующим образом: выбираем две темные полосы, достаточно удаленные друг от друга, и измеряем расстояние между ними l . Следует подсчитать количество светлых полос N , находящихся между этими темными полосами. Найти ширину одной интерференционной полосы $u = l / N$. Проводить измерения u пять раз при разных l и N . Все данные внести в табл. 6.1.

3. По шкале, расположенной на оптической скамье, измерить расстояние от экрана Юнга до мерного экрана L . По формуле (6.1) вычислить расстояние между щелями $d_{\text{ср}}$ для каждого значения u . Вычислить погрешности измерения $d_{\text{ср}}$ и $u_{\text{ср}}$.

Таблица 6.1

Результаты измерений

Номер опыта	N	l , мм	u , мм	$(\bar{u} - u_i)^2$, мм ²	d , мм	$(\bar{d} - d_i)^2$, мм ²
1						
2						
3						
4						
5						
$\bar{u} =$ $\sum(\bar{u} - u_i)^2 =$ $\bar{d} =$ $\sum(\bar{d} - d_i)^2 =$						

Вычисление погрешностей

1. Определить среднее арифметическое значение расстояния между щелями и ширины одной интерференционной полосы:

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n d_i,$$

где N – число опытов.

2. Необходимо вычислить квадраты случайных отклонений $(\bar{d} - d_i)^2$ и записать их в табл. 6.1.

3. Вычислить среднеквадратичное отклонение среднего арифметического:

$$S_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{d} - d_i)^2}.$$

4. Определить коэффициент Стьюдента $t_{p,N}$ согласно выбранной доверительной вероятности p и числа опытов N в данной серии измерений (где $t_{p,N} = 2,78$ для $N = 5$ и $p = 0,95$).

5. Вычислить случайную погрешность расстояния между щелями и ширины одной интерференционной полосы по формуле:

$$\Delta_{сл} = t_{p,N} \cdot S_{\bar{d}}.$$

6. Рассчитать систематическую погрешность расстояния между щелями и ширины одной интерференционной полосы:

$$\Delta_{cu} = u \cdot \left(\frac{\Delta l}{l}\right),$$

$$\Delta_c = b \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta_{cu}}{u_{cp}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2},$$

где Δ_l и ΔL – погрешности измерения расстояний. Для l возьмите минимальное значение из табл. 6.1, а L – расстояние от экрана Юнга до мерного экрана.

7. Вычислить полную погрешность расстояния между щелями и ширины одной интерференционной полосы:

$$\Delta_d = \sqrt{\Delta_c^2 + \Delta_{cl}^2}.$$

8. Записать окончательный результат в виде:

$$d = \bar{d} \pm \Delta_d,$$

$$u = \bar{u} \pm \Delta_u.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое «интерференция света»?
2. Какие волны являются когерентными? Перечислите типы когерентности.
3. Какой свет является монохроматичным?
4. Дайте определение разности хода лучей и их типов.
5. Нарисуйте оптическую схему лучей в опыте Юнга.
6. Запишите условие интерференционного максимума и минимума.
7. Что понимается под шириной интерференционной полосы?

Лабораторная работа № 7

ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА

Цель работы: проверка закона Малюса.

Краткая теория

Свет представляет собой поперечную электромагнитную волну. В однородных средах вектора напряженностей электрического поля E и магнитного поля H колеблются во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 7.1). Электромагнитное излучение, в котором направление электрического поля E остается неизменным, называется *линейно* или *плоско поляризованным излучением*, а плоскость, проведенная через направление вектора E (его называют *световым вектором*) и направление распространения колебаний называется *плоскостью поляризации*.

В излучении естественного источника направление электрического поля хаотически меняется, оставаясь, однако, перпендикулярным направлению распространения волны. Такое излучение называется *неполяризованным*.

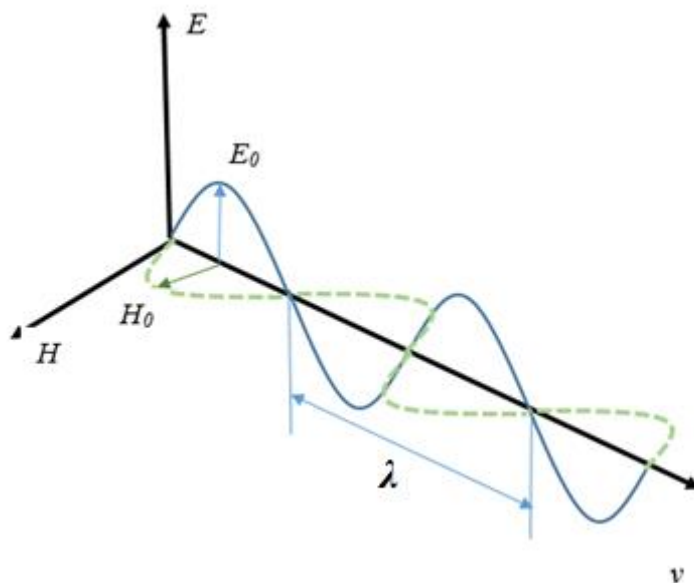


Рис. 7.1. Иллюстрация колебания векторов напряженности электрического и магнитного полей

Большинство источников испускает некогерентный неполяризованный свет. Неполяризованный свет можно поляризовать с помощью поляризационных приборов (рис. 7.2). Такие приборы называются *поляризаторами*.

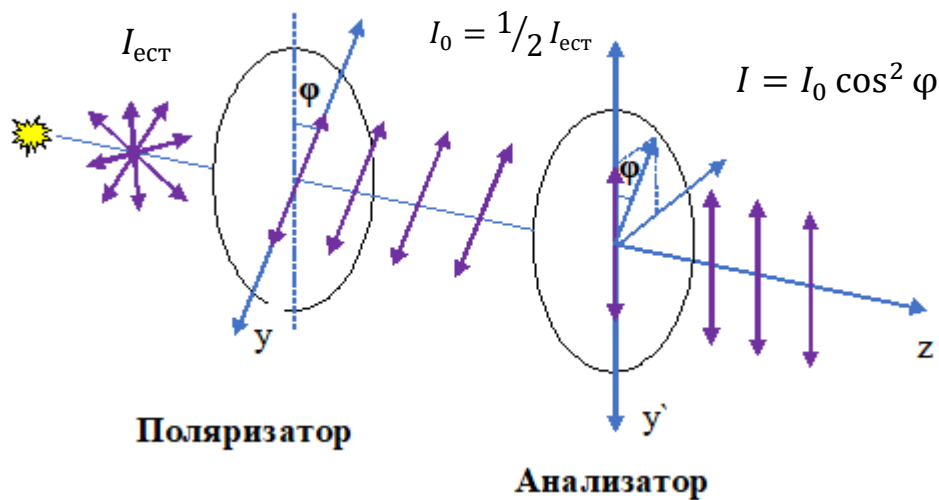


Рис. 7.2. Иллюстрация прохождения неполяризованного света через систему поляризатор-анализатор

Обычный свет образован излучением большого числа молекул и атомов, которые излучают независимо друг от друга. Световой вектор волны является результатом суперпозиции электрических полей цугов, испускаемых всеми атомами источника. Каждый атом во время акта излучения испускает цуг волн, плоско поляризованный в определенной плоскости, и из-за очень большого количества излучающих атомов направление вектора E , хотя и остается перпендикулярным оси z , меняется беспорядочно. Свет, в котором из-за хаотического изменения направления вектора E все направления светового вектора равновероятны, называется *неполяризованным* или *естественным*. Наиболее близок к естественному прямой солнечный свет.

Пусть пучок света монохроматический с угловой частотой ω . Так как напряженность электрического поля в электромагнитной волне меняется гармонически, то ее составляющие вдоль осей x и y можно представить в виде:

$$E_x = E_{x0} \cos(\omega t), \quad E_y = E_{y0} \cos(\omega t + \varphi), \quad (7.1)$$

здесь E_{x0} и E_{y0} – амплитуды колебаний x -й и y -й компонент, а φ – разность фаз между ними, (φ всегда можно выбрать так, чтобы его модуль не превышал π). Вообще говоря, уравнения (7.1) описывают эллипс. Этот эллипс конец светового вектора проходит за один период колебаний. Если $0 < \varphi < \pi$, то вращение происходит по часовой стрелке, и такой свет называется *право эллиптически* (или *положительно*) *поляризованным*. Если $-\pi < \varphi < 0$, то вектор вращается против часовой стрелки. Такой свет называется *лево эллиптически* (или *отрицательно*) *поляризованным*.

Эллипс может вырождаться в отрезок прямой линии, если $\varphi = 0$ или $\pm \pi$, такой свет является *линейно поляризованным*. Если $E_{x0} = E_{y0}$ и $\varphi = \pm \pi/2$, эллипс

превращается в окружность. Такая волна называется *циркулярно поляризованной* или *поляризованной по кругу*. Если $\varphi = \pi/2$, свет право циркулярно поляризован, если $\varphi = -\pi/2$, – свет лево циркулярно поляризован.

Немонохроматический свет не может быть положительно или отрицательно поляризован, как и компоненты, колеблющиеся с разными частотами, но может быть плоско поляризован. Немонхроматический свет, не являющийся ни естественным, ни линейно поляризованным, называется *частично поляризованным*.

Для произвольных декартовых осей x и y , перпендикулярных направлению распространения волны, любую световую волну можно представить как результат наложения двух фракций, одна из которых линейно поляризована параллельно оси x , а другая — параллельно оси y .

Естественный свет частично поляризуется при отражении, преломлении и даже при рассеянии в атмосфере. Например, если свет падает на границу раздела двух прозрачных сред под таким углом, что отраженный и преломленный луч перпендикулярны, отраженный луч будет линейно поляризован перпендикулярно плоскости падения (закон Брюстера).

Свет с линейной поляризацией создают *лазеры* – источники оптического излучения, в рабочей зоне которого созданы специальные условия для того, чтобы атомы среды излучали свет согласованно. Из естественного света можно получить поляризованный свет, используя различные оптические явления.

Если на поляризатор падает линейно поляризованный свет с вектором напряженности E и плоскость колебаний составляет угол α с плоскостью поляризатора, то в волне, прошедшей через идеальный поляризатор, остается только компонента E_1 , параллельная плоскости поляризатора (рис.7.3)

$$E_1 = E \cos(\alpha), \quad E_2 = 0.$$

Поскольку интенсивность пропорциональна среднему квадрату напряженности, то для интенсивности линейно поляризованного света, прошедшего через идеальный поляризатор, получаем соотношение, называемое законом Малюса:

$$I_1 = I \cos^2(\alpha). \quad (7.2)$$

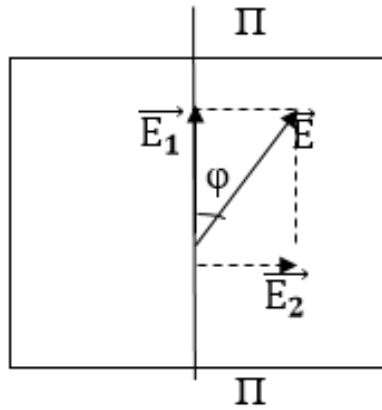


Рис. 7.3. Проекции вектора напряженности электрического поля для линейно поляризованного света

При падении на поляризатор естественного света в прошедшей волне, в результате двойного лучепреломления остается одна из компонент колебаний, параллельная плоскости пропускания (другая поглощается), т. е. естественный свет превращается в линейно поляризованный. Интенсивности, соответствующие взаимно перпендикулярным колебаниям, в естественном свете одинаковы и равны половине общей интенсивности $I_{\text{ест}}$. После поляризатора имеем поляризованную волну с интенсивностью одной из ортогональных компонент:

$$I_{\text{прош}} = I_{\text{ест}}/2. \quad (7.3)$$

При попадании на поляризатор частично поляризованного света закону Малюса подчиняется только поляризованная компонента $I_{\text{поляр}}$. С учетом (7.2) и (7.3) получим:

$$I_{\text{прош}} = I_{\text{поляр}} \cos^2(\alpha) + I_{\text{ест}}/2.$$

При $\alpha = 0$ интенсивность максимальна, при $\alpha = \pi/2$ - минимальна:

$$I_{\text{max}} = I_{\text{поляр}} + I_{\text{ест}}/2,$$

$$I_{\text{min}} = I_{\text{ест}}/2.$$

Поворачивая идеальный поляризатор вокруг оси z и измеряя интенсивность прошедшего света, можно найти степень поляризации падающего излучения:

$$P = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}. \quad (7.4)$$

Для плоско поляризованного света $I_{\text{max}} = 0$ и $P = 1$, для естественного света $I_{\text{max}} = I_{\text{min}}$ и $P = 0$.

Поляризатор, используемый для анализа поляризации излучения, называют *анализатором*.

При некотором угле падения на диэлектрическую пластинку, называемом углом Брюстера ($\alpha_{\text{Бр}}$), отраженный луч становится полностью поляризованным (плоско поляризованным). Угол Брюстера определяется следующим соотношением:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{Бр}} = n_{12}. \quad (7.5)$$

Если на границу раздела двух диэлектриков под углом Брюстера падает плоскополяризованный свет (например, от лазера) с направлением колебаний вектора E в плоскости падения волны, то интенсивность отраженной волны становится ближе к нулю. Это объясняется тем, что в падающей волне отсутствует направление колебаний светового вектора, необходимого для создания отраженной волны.

Степень линейности поляризации P прошедшего сквозь стекло луча при угле падения, равном $\alpha_{\text{Бр}}$, достигает наименьшего значения. Этот луч остается поляризованным частично.

Необходимые приборы. Порядок выполнения работы

1. Для проверки закона Малюса необходимо собрать установку, оптическая схема которой изображена на рис. 7.4.

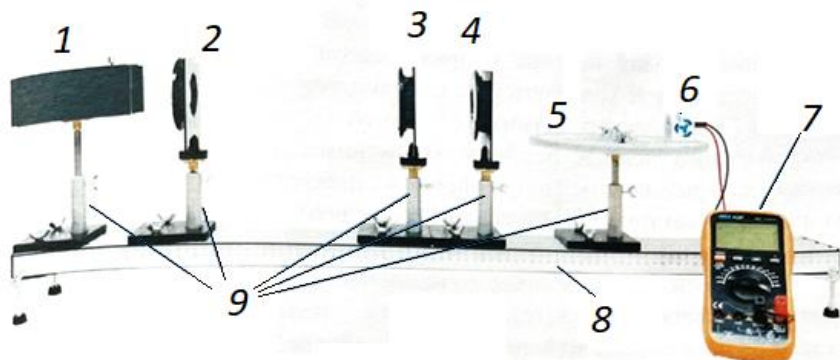


Рис. 7.4. Установка «Поляризация света»:

1 – осветитель; 2 – линза; 3 – поляризатор; 4 – анализатор; 5 – поворотный столик;
6 – фотоприемник; 7 – мультиметр; 8 – скамья оптическая; 9 – рейтеры

2. С помощью измерителей углов поворота установить на поляризаторе и анализаторе угол 0° .

3. На мультиметре красный щуп вставить в отверстие «mA», а черный в «COM». Поворотным переключателем выберите режим амперметра на «A=», постоянный ток. Красный щуп от мультиметра вставьте в красное гнездо фотоприемника 6, черный щуп – в черное гнездо (если мультиметр показывает 1, это указывает на перегрузку и необходимость выбрать больший предел измерений).

4. Перед началом эксперимента измерить фототок фотоэлемента при естественном освещении $I_{\text{ест}}$, результаты занести в табл. 7.1. Осветитель при этом должен быть выключен.

5. Включить осветитель 1.
6. Измерить фототок фотоэлемента при угле анализатора $\varphi = 0^\circ$, что соответствует максимальному значению фототока.
7. Поворачивая анализатор, измерить интенсивность света, падающего на фотоэлемент, соединенный с мультиметром, через каждые 10° снимайте зависимость силы тока от угла поворота анализатора. Отсчеты производят от 0° до 180° . В зависимости от интенсивности света сила фототока I_ϕ будет меняться.

Таблица 7.1

Результаты измерений										
	Угол поворота анализатора φ									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
I_ϕ										
$\cos^2 \varphi$										
	Угол поворота анализатора φ									
	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
I_ϕ										
$\cos^2 \varphi$										
$I_{\text{ест}}$										

8. Определить зависимость силы фототока от квадрата косинуса угла поворота $I_\phi = f(\cos^2 \varphi)$.
9. Построить зависимость силы фототока I_ϕ от угла φ .
10. Проанализировать график и сделать выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой свет?
2. Какие приборы называются поляризаторами?
3. При каких условиях естественный свет считается частично поляризованным?
4. Чем отличается положительная и отрицательная поляризация?
5. Какую волну называют поляризованной по кругу?
6. Что такое лазеры?
7. Сформулируйте закон Малюса.
8. Как найти степень поляризации?
9. Что называют анализатором?
10. Что происходит при угле Брюстера?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Савельев, И. В.* Курс общей физики / И. В. Савельев. – В 5 книгах, книга 4. – Москва : Астрель, АСТ, 2003. – 256 с. – Текст : непосредственный.
2. *Общий курс физики. Оптика.* – В 5 томах, том 4. – Москва : Физмат-лиг, Изд-во МФТИ, 2002. – 792 с. – Текст : непосредственный.
3. *Иверонова, В. И.* Физический практикум / под ред. В. И. Ивероновой. – Москва : Физматгиз, 1962. – 956 с. – Текст : непосредственный.
4. *Трофимова, Т. И.* Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 22-е изд., стер. – Москва : Издательский центр «Академия», 2016. – 568 с. – Текст : непосредственный.

Учебное издание

ЗАЙЦЕВ Дмитрий Викторович
МОРИЛОВ Владимир Васильевич
КУКЛИНА Александра Александровна
САФОНОВ Александр Николаевич

ФИЗИКА

Часть 3
ОПТИКА

*Учебно-методическое пособие
по дисциплине «Физика»
к выполнению лабораторных работ
для студентов
всех специальностей и направлений
очного и заочного обучения*

Редактор изд-ва *О. Е. Глушкова*
Компьютерная верстка *А. А. Куклиной, О. Е. Глушковой*

Подписано в печать 27.09.2024.
Бумага писчая. Формат 60 × 84 1/16.
Печать офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печ. л. 4,25. Уч-изд. л. 1,97. Тираж 150 экз.

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Отпечатано в типографии ООО «Издательство УМЦ УПИ»
г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35 а, оф. 2
Тел.: (343) 362-91-16, 362-91-17