

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА**

ФИЗИКА

ОПТИКА

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ**



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2005**

ПРЕДИСЛОВИЕ

Свет во многих ситуациях можно считать электромагнитной волной. Волна – это распространение колебаний. В отличие от звуковой волны здесь колеблются не частицы среды, а колеблются поля. На рис. 1 показаны: напряженность электрического поля \vec{E} (световой вектор), индукция магнитного поля \vec{B} и скорость распространения волны \vec{V} . Направление колебаний перпендикулярно направлению распространения (лучу). Это означает, что электромагнитная волна является волной поперечной.

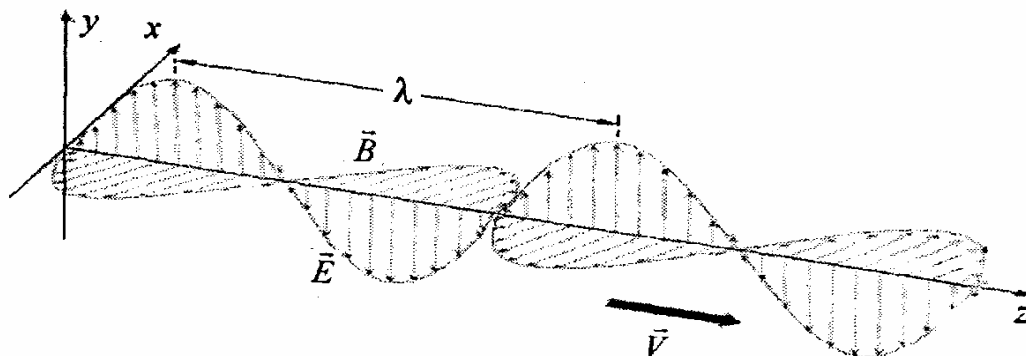


Рис. 1

Цветовой состав видимого света всем нам хорошо знаком по виду радуги с ее краями фиолетовым и красным. В шкале электромагнитных волн (рис. 2) видимый диапазон представлен очень узким интервалом длин волн от $\lambda_{\text{фиол}} = 4 \cdot 10^{-7}$ м до $\lambda_{\text{красн}} = 7,6 \cdot 10^{-7}$ м. (Запомните! $\lambda_{\text{красн}} > \lambda_{\text{фиол}}$).



Рис. 2

В настоящем цикле лабораторных работ изучаются следующие явления, связанные с волновыми свойствами света: интерференция; дифракция; поляризация; дисперсия.

Будущие связисты должны усвоить, что и для радиоволн характерны эти явления.

Работа 7.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

Цель работы

Целью работы является изучение интерференции света и определение длины волны с помощью бипризмы Френеля.

Введение

Интерференцией света называется такое наложение двух (или нескольких) световых волн, при котором в пространстве образуются области с максимумами и минимумами интенсивности света. Если в ту часть пространства, где накладываются волны, помещен экран, на нем наблюдается система светлых и темных линий – интерференционная картина. Наблюдение интерференционной картины возможно также с помощью фотопластинки или зрительной трубы.

Устойчивая интерференционная картина возникает только в том случае, если волны, накладываются друг на друга, являются когерентными, т. е. такими, у которых одинакова частота, а разность фаз не меняется со временем. Источниками когерентных волн являются лазеры. Обычные же источники (например, лампы накаливания) дают некогерентные волны, и получение интерференционной картины с помощью двух таких источников невозможно.

Это связано с тем, что свечение вещества в обычных источниках представляет собой беспорядочную последовательность быстрых элементарных актов высвечивания отдельных атомов (молекул). В возбужденном состоянии атом существует («живет») около 10^{-8} с и примерно за такое же время атом переходит в состояние с меньшей энергией, испуская при этом порцию света.

Однако в классических опытах по наблюдению интерференции (опыт Юнга, бипризма Френеля, кольца Ньютона и т. д.) использовались обычные источники света. Это возможно благодаря следующему приему: световую волну разделяют на две части с помощью щелей, зеркал или призм. Две новые волны, конечно же, когерентны и в той части пространства, где они накладываются, возможно наблюдение интерференционной картины.

Теоретическое обоснование методики

Одним из методов разделения пучка света на два когерентных пучка в целях получения интерференционной картины является метод бипризмы, предложенный Френелем.

Бипризма Френеля представляет собой две одинаковые стеклянные

призмы с общим основанием $aa'b'b$ и малым углом преломления $\varphi \ll 1$ рад (рис. 1). В установке используется линейный источник света: освещаемая лампой накаливания узкая прямоугольная щель в непрозрачном экране. Щель располагается в плоскости, проходящей через основания призм параллельно ребру bb' бипризмы. На рис. 2 изображено сечение установки плоскостью, перпендикулярной преломляющему ребру.

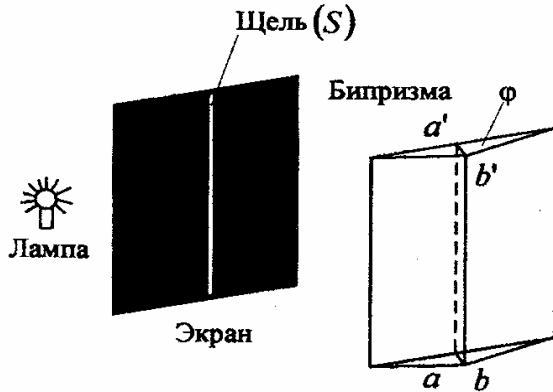


Рис. 1

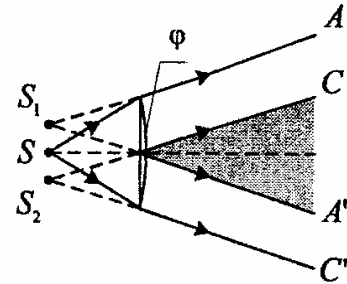


Рис. 2

Луч, вышедший из источника, после прохождения через призму отклоняется к основанию на угол $(n - 1)\varphi$, где n – показатель преломления стекла. Свет, вышедший из источника S , после преломления в бипризме распространяется в виде двух пучков ASA' и CSC' . В области наложения лучей (на рисунке она затенена) возможно наблюдение интерференционной картины. Можно считать, что интерферирующие пучки созданы двумя мнимыми когерентными источниками S_1 и S_2 , расположенными в той же плоскости, что и щель.

Интенсивность света в точке M , находящейся на расстоянии x от плоскости симметрии системы (плоскости, проходящей через щель и ребро bb' бипризмы) и на расстоянии D от плоскости, содержащей мнимые источники, зависит от разности хода δ лучей S_1M и S_2M , приходящих в точку M от источников S_1 и S_2 (рис. 3). Расчет разности хода при условии $d \ll D$ приведен ниже.

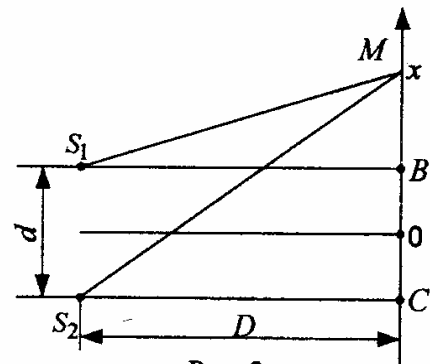


Рис. 3

Из прямоугольных треугольников MBS_1 и MCS_2 получаем

$$S_2M^2 = (x + d/2)^2 + D^2; \quad S_1M^2 = (x - d/2)^2 + D^2,$$

где d – расстояние между мнимыми источниками. После почленного вычитания получаем

$$(S_2M - S_1M)(S_2M + S_1M) = 2xd. \quad (1)$$

В используемой экспериментальной установке углы MS_1B и MS_2C очень малы, поэтому с хорошей точностью $S_2M + S_1M = 2D$. Поскольку разность хода лучей $\delta = S_2M - S_1M$, из (1) получаем

$$x = \frac{D}{d} \delta.$$

Как известно, для интерференционного усиления необходимо выполнение условия $\delta = k\lambda$, где k – целое число ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$), λ – длина световой волны. Для ослабления необходимо, чтобы $\delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$. Координаты точек, в которых наблюдаются максимумы интенсивности света, будут, следовательно,

$$x_k = \frac{D}{d} k\lambda. \quad (2)$$

Координаты точек, в которых наблюдаются минимумы интенсивности света, будут

$$x_k = \frac{D}{d} (2k + 1)\frac{\lambda}{2}. \quad (2')$$

Для получения монохроматического света в установку вводят светофильтр.

Интерференционная картина в поле зрения трубы имеет вид чередующихся темных и светлых полос, параллельных источнику света (щели). Координаты центров светлых и темных полос определяются по формулам (2) и (2') соответственно. Расстояние a между центрами соседних светлых полос согласно (2) равно:

$$a = x_{k+1} - x_k = \frac{D}{d} \lambda (k + 1 - k) = \frac{D}{d} \lambda. \quad (3)$$

Таким же является расстояние между центрами соседних темных полос. Как следует из (3), величина a не изменяется с удалением от плоскости симметрии. Измерив a , d и D , можно определить длину волны света λ :

$$\lambda = \frac{ad}{D}. \quad (4)$$

Описание лабораторной установки. Метод измерения

На рис. 4 показано расположение щели S , фильтра Φ , бипризмы B и зрительной трубы. Между зрительной трубой и бипризмой введена рамка с проволокой $Пр$. Источник освещается лампой накаливания 1, размещенной в фокальной плоскости собирающей линзы 2.

Измерение расстояния a между центрами соседних светлых (или темных) интерференционных полос производится при помощи окулярной шкалы зрительной трубы микроскопа. Если, например, расстояние между центрами каких-то темных полос составляет N делений шкалы окуляра и на этом расстоянии укладывается n светлых интерференционных полос, то

расстояние a между центрами соседних темных интерференционных полос равно

$$a = \frac{N}{n} G, \quad (5)$$

где G – цена малого деления окуляра, указанная на рабочем месте.

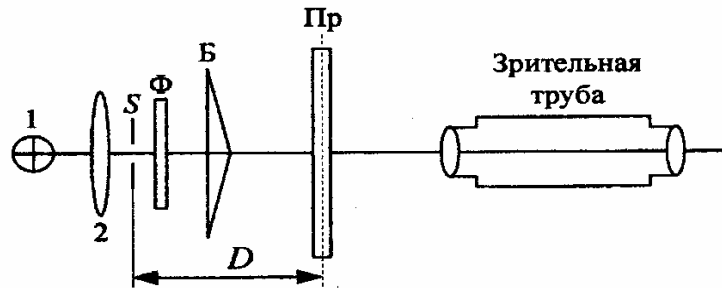


Рис. 4

Расстояние D от интерференционной картины, видимой при данном положении зрительной трубы, до источника света S может быть найдено следующим образом. Между зрительной трубой и линзой вводят проволоку. Перемещая проволоку вдоль оптической скамьи, находят такое ее положение, при котором как проволока, так и интерференционная картина отчетливо видны в зрительную трубу. При этом, очевидно, проволока находится в той же плоскости, в которой расположена интерференционная картина, наблюдаемая в зрительную трубу. Расстояние D измеряют по отчетной шкале оптической скамьи.

Для нахождения расстояния d между мнимыми источниками S_1 и S_2 поступают следующим образом. Между бипризмой и зрительной трубой вводят собирающую линзу P .

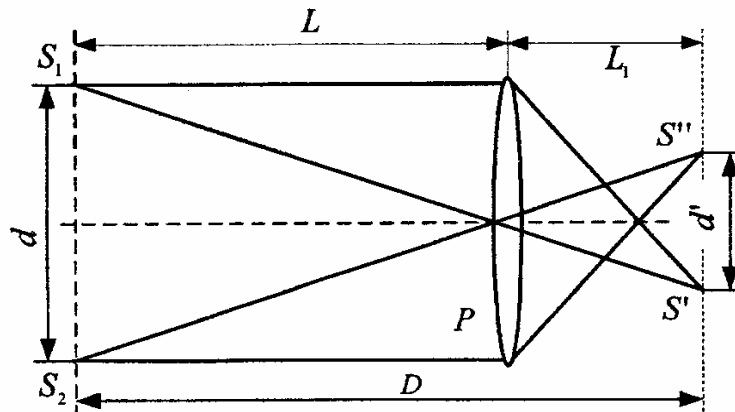


Рис. 5

На рис. 5 показан ход лучей от двух мнимых источников S_1 и S_2 , преломление этих лучей в линзе P и образование двух изображений S' и S'' .

При перемещении линзы вдоль оптической скамьи положение изобра-

жений также перемещается. Если изображения S' и S'' отчетливо видны в зрительную трубу, значит, они находятся в той плоскости, в которой наблюдается интерференционная картина и в которой расположена проволока. На рис. 4 показано такое положение: расстояние плоскости изображений от плоскости источников равно D . Расстояние между изображениями мнимых источников d' должно быть измерено при помощи зрительной трубы так же, как было измерено расстояние a между соседними интерференционными линиями. Пусть в делениях окулярной шкалы это расстояние равно d' . Тогда в метрах оно равно $G \cdot d'$. Чтобы найти искомое расстояние d между мнимыми источниками S_1 и S_2 , следует воспользоваться известным соотношением для тонкой линзы: отношение размера d к размеру d' равно отношению расстояния L линзы от источника к расстоянию L_1 линзы от изображения.

Длина L измеряется по шкале оптической скамьи, а длина $L_1 = D - L$. Тогда расстояние d между мнимыми источниками S_1 и S_2 будет равно

$$d = \frac{L}{D - L} d' G. \quad (6)$$

Воспользовавшись полученными выражениями (5) и (6) для величин a и d , получаем из (4) выражение для длины волны света

$$\lambda = G^2 \frac{NLd'}{nD(D - L)}. \quad (7)$$

Порядок выполнения работы

Осветитель со щелью, фильтр, бипризма и зрительная труба уже установлены на оптической скамье.

ВНИМАНИЕ! Не трогайте щель и бипризму. Если изменится их взаимное расположение, лаборанту придется повторить трудоемкую процедуру юстировки (настройки) оптической системы.

1. Включить осветитель. Убедиться, что в зрительную трубу наблюдается интерференционная картина в виде нескольких вертикальных светлых и темных полос.

2. Наладить положение зрительной трубы, при необходимости можно:
 - наклонять влево – вправо держатель зрительной трубы, чтобы наблюдаемая картина оказалась в центре поля зрения;
 - повернуть окуляр зрительной трубы, чтобы вертикальная линия перекрестия оказалась параллельной интерференционным полосам.

3. Измерить в малых делениях шкалы расстояние N между центрами двух максимально удаленных друг от друга темных полос. Определить число n светлых полос, заключенных между ними. Величины n и N записать в таблицу.

4. Измерить расстояние D от щели S до плоскости, в которой распо-

ложена интерференционная картина, наблюдаемая в зрительную трубу. Для этого установить на оптическую скамью рамку с проволокой Пр, как показано на рис. 4, и перемещать рамку до тех пор, пока в зрительной трубе изображение проволоки не станет наиболее четким. Произвести отсчет положения проволоки по линейке оптической скамьи. Это измерение следует сделать пять раз, каждый раз сдвигая проволоку и вновь устанавливая наибольшую четкость.

5. Измерить расстояние d между мнимыми источниками S_1 и S_2 . Для этого установить на оптическую скамью собирательную линзу, предварительно сняв со скамьи рамку с проволокой. Перемещать линзу до тех пор, пока в зрительную трубу не будут отчетливо видны изображения S' и S'' мнимых источников. Измерить в малых делениях окулярной шкалы расстояние d' между этими изображениями. Отметить положение линзы по линейке оптической скамьи и записать расстояние L от щели до линзы. Эти измерения следует произвести пять раз, каждый раз заново определяя положение, при котором изображения мнимых источников наиболее отчетливы. Результаты измерений занести в таблицу.

Задание к работе

1. Подсчитайте средние значения D , d' , L , отклонения от средних для этих величин и квадраты этих отклонений.

2. По полученным средним значениям по формуле (7) подсчитайте длину волны света.

3. Рассчитайте абсолютную и относительную погрешности. Результат представьте в виде доверительного интервала для найденной длины волны.

Цвет фильтра									
Число интерференционных полос									
Число делений N шкалы									
Переводной множитель G , м/дел.									
№ изм.	D	ΔD	$(\Delta D)^2$	d'	$\Delta d'$	$(\Delta d')^2$	L	ΔL	$(\Delta L)^2$
Среднее									
Длина волны λ									

Контрольные вопросы

1. Что колеблется в световой волне?
2. Что такое длина волны?
3. Какой свет называется монохроматическим?

4. Что такое интерференция света?
5. Какие волны называются когерентными?
6. Поясните смысл всех физических величин, входящих в рабочую формулу.
7. Покажите, что луч, вышедший из источника, после прохождения через стеклянную призму с малым углом преломления φ отклоняется к основанию призмы на угол $(n-1)\varphi$, где n – показатель преломления стекла.

Работа 7.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ ПРИ ПОМОЩИ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

Цель работы

Знакомство с одной из классических схем наблюдения интерференции света. Использование ее для оптических измерений.

Введение

Интерференция света – это наложение двух когерентных волн, приводящее к устойчивому распределению в пространстве максимумов и минимумов интенсивности (см. введение работы 7.1).

Одним из методов разделения света на два когерентных пучка является отражение монохроматического света от верхней и нижней поверхностей плоскопараллельной пластины. Пусть на плоскопараллельную пластину падает параллельный пучок света под углом i . При этом из каждой точки освещенной поверхности в направлении зеркального отражения идут волна 1, отраженная от верхней поверхности, и волна 2, отраженная от нижней поверхности (рис. 1). Они имеют почти одинаковую интенсивность $I_1 \approx I_2$, следовательно, они могут эффективно усиливать или ослаблять друг друга в зависимости от оптической разности хода лучей δ .

Чтобы определить оптическую разность хода, построим волновую поверхность AC преломленной волны (ВП на рис. 1). Отставание по фазе колебаний, пришедших в точку C вдоль луча I_2 определяется длиной ломаной линий со стрелками внутри пластины $A0 + 0C$. Из вспомогательного построения на рис. 1 видно, что ее длина, т. е. геометрическая разность хода лучей, равна $AB = 2d \cos r$. Здесь d – толщина пластины, r – угол преломления (i – угол падения). С учетом показателя преломления n вещества, из которого сделана пластина, получаем следующее выражение для оптической разности хода лучей:

$$\delta = 2dn \cos r + \frac{\lambda}{2}. \quad (1)$$

Здесь λ — длина световой волны в воздухе. Добавка $\frac{\lambda}{2}$ обусловлена тем, что при отражении света от оптически более плотной среды (т. е. от верхней границы пластины) возникает дополнительная разность фаз в π (рад). Если δ оказалась кратной длине волны ($\delta = k\lambda$, где $k = 1, 2, 3, \dots$ — целое число), то будет происходить усиление отраженного света. Ослабление света происходит при условии

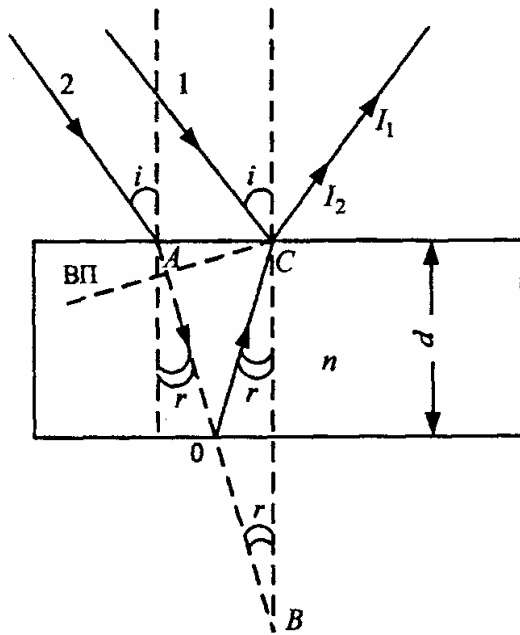


Рис. 1

$$\delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Следует иметь в виду, что интерференция отчетливо наблюдается только на тонких пластинах (пленках), толщина которых соизмерима с длиной волны λ [1].

В настоящей работе изучаются кольца Ньютона, т. е. интерференционная картина, возникающая при освещении выпуклой стеклянной линзы большого радиуса кривизны

и толстой стеклянной пластины. При нормальном падении света на такую систему наблюдаются светлые и темные кольца с общим центром в точке соприкосновения линзы и пластины.

Рассмотрим образование колец Ньютона в отраженном свете. Роль тонкой пленки играет воздушный зазор между линзой и пластиной. Интерferируют волны, отраженные от верхней (с интенсивностью I_1) и нижней (с интенсивностью I_2) границ зазора, как показано на рис. 2. В связи с относительно малой толщиной воздушного зазора пренебрежем изменением направления световых лучей на границах раздела воздуха и стекла.

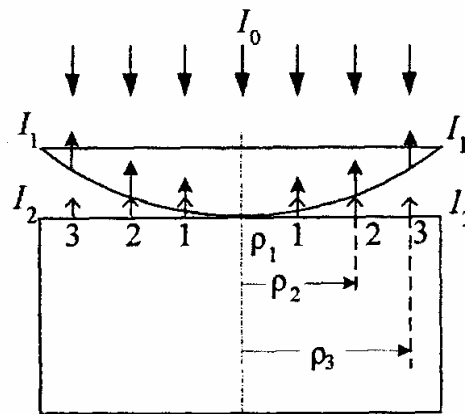


Рис. 2

В непосредственной близости от оси, где толщина зазора много меньше длины волны света $d \ll \lambda$, формула для оптической разности хода отраженных волн согласно (1) прини-

мает вид $\delta = \frac{\lambda}{2}$. Поэтому в центре в отраженном свете наблюдается темное пятно. На некотором расстоянии ρ_1 от оси системы разность хода этих двух волн оказывается равной $\delta_1 = \frac{3}{2}\lambda$. Таким образом, в точке 1 отраженные волны ослабляют друг друга. Поскольку система обладает осевой симметрией, толщина зазора остается одинаковой для всех точек, одинаково удаленных от оси. Поэтому в отраженных лучах наблюдается первое темное кольцо Ньютона радиусом ρ_1 . На некотором расстоянии ρ_2 от оси толщина зазора снова становится «ослабляющей» (точка 2). Здесь $\delta_2 = \frac{5}{2}\lambda$ и возникает второе темное кольцо Ньютона. Далее при некотором ρ_3 оптическая разность хода отраженных волн будет $\delta_3 = \frac{7}{2}\lambda$ и т. д.

Определим радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете.

Оптическая разность хода лучей, отраженных от верхней и нижней границ воздушной прослойки, при нормальном падении света ($i = r = 0$) равна (см. формулу (1))

$$\delta_k = 2d_k + \frac{\lambda}{2}, \quad (2)$$

где d_k — толщина воздушной прослойки в месте наблюдения кольца с номером k .

Условие взаимного ослабления двух волн $\delta_k = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$. Приравнивая правые части, получаем $2d_k = k\lambda$, или

$$d_k = \frac{k\lambda}{2}. \quad (3)$$

По теореме Пифагора (рис. 3) $R^2 = \rho_k^2 + (R - d_k)^2$, где R — радиус кривизны линзы. Отсюда

$$2Rd_k = \rho_k^2 + d_k^2 \approx \rho_k^2. \quad (4)$$

Здесь учтено, что $d_k \ll \rho_k$. Подставляя (4) в (3), получим

$$\rho_k^2 = 2R \frac{k\lambda}{2} = Rk\lambda.$$

Окончательно для радиусов темных колец получаем

$$\rho_k = \sqrt{Rk\lambda} \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (5)$$

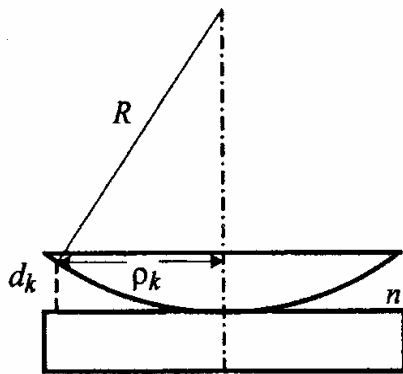
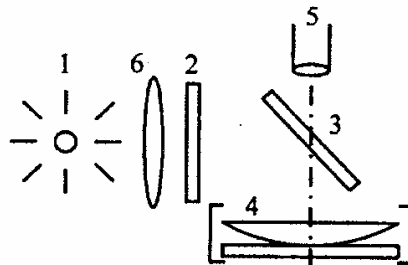


Рис. 3

Методика выполнения работы

Схема установки представлена на рис. 4.

Свет от лампы 1, пройдя фильтр 2, отражается полупрозрачным зеркалом 3 и вертикально падает на линзу с пластиной. Линза и пластина закреплены в общей оправе 4. Источник 1 расположен в фокусе собирающей линзы 6, поэтому оправа 4 освещается параллельными лучами света. Отразившись от верхней и нижней границ воздушного зазора между линзой и пластиной, свет поступает в объектив 5 микроскопа. (На некоторых лабораторных установках лампа, фильтр и полупрозрачное зеркало вмонтированы внутрь микроскопа; при этом освещение линзы с пластиной производится через объектив). Передвигая по вертикали тубус микроскопа, можно добиться отчетливой видимости интерференционных колец Ньютона. Длина волны света λ , пропускаемого фильтром (или его частота $\nu = c/\lambda$), указана на рабочем месте.



Для определения радиуса кривизны линзы R в соответствии с (5) достаточно измерить радиус темного кольца с известным номером k . Но идеального соприкосновения сферической и плоской поверхностей добиться невозможно: деформация стекла приводит к тому, что воздушный зазор начинается на некотором удалении от оси системы. В результате этого вместо соотношения $\rho_k^2 = Rk\lambda$, предсказываемого формулой (5), оказывается справедливым соотношение

$$\rho_k^2 = \text{const} + Rk\lambda. \quad (6)$$

С учетом этого в настоящей работе предлагается построить экспериментальную зависимость ρ_k^2 от $k\lambda$ и определить для нее угловой коэффициент, который должен быть равен искомой величине R .

Порядок выполнения работы

1. Включить осветитель. Вращая ручку вертикального перемещения, добиться наилучшей резкости наблюдаемой интерференционной картины.

2. Для измерения радиусов колец Ньютона в установке обеспечена возможность *горизонтального* перемещения оправы с линзой.

Прежде чем начинать измерения, следует вручную или с помощью горизонтальных подвижек выставить оправу в такое положение, чтобы в перекрестии окуляра оказался центр колец. После этого с помощью горизонтальной подвижки необходимо сместить картину, включая пятое темное кольцо в правую сторону от перекрестия окуляра. Затем, плавно вращая

ручку горизонтальной подвижки в обратную сторону, подвести под перекрестие середину темной интерференционной полосы, соответствующей левому краю пятого темного кольца. Записать в табл. 1 отсчет $Z_{5\text{лев}}$. Продолжая поворот микрометрического винта в ту же сторону, подвести под перекрестие левый край четвертого темного кольца и снять новый отсчет $Z_{4\text{лев}}$. Так последовательно записать в табл. 1 координаты Z левых краев первых пяти темных колец. Плавнo перейдя через центр интерференционной картины, вывести в перекрестие окуляра правый край самого маленького кольца ($k = 1$) и записать отсчет $Z_{1\text{прав}}$ в соответствующий столбец табл. 1. Продолжая смещать оправу с линзой, последовательно записать в табл. 1 координаты правых краев всех пяти колец.

ВНИМАНИЕ! Весь проход вдоль интерференционной картины (от $k = 5$ до $k = 1$ с левой стороны и дальше от $k = 1$ до $k = 5$ с правой стороны) должен осуществляться поворотом микрометрического винта *только в одну сторону*. Иначе люфт горизонтальной подвижки внесет существенные искажения в измерение координат.

3. Записать в протокол длину волны $\lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\lambda$ (или частоту ν), указанную на рабочем месте, и погрешность отсчета по шкале горизонтальной подвижки ΔZ (цена деления нониусной шкалы).

Таблица 1

Номер кольца k	Отсчет по шкале Z	
	левый край	правый край
5		
4		
3		
2		
1		

Порядок обработки результатов

1. Для всех измеренных колец Ньютона вычислить радиусы

$$\rho_k = \frac{1}{2} |Z_{k\text{лев}} - Z_{k\text{прав}}|$$

2. Для всех k вычислить $x_k = k\lambda$, $y_k = \rho_k^2$.

Результаты пп. 1 и 2 записать в табл. 2.

Таблица 2

Номер кольца k	Радиус кольца ρ_k	$x_k = k\lambda$	$y_k = \rho_k^2$
5			
4			
3			
2			
1			

3. Построить график зависимости $y(x)$. По угловому коэффициенту прямой, аппроксимирующей полученную зависимость, оценить радиус кривизны линзы (рис. 5) $R = \frac{\Delta y}{\Delta x}$.

4. Можно определить радиус кривизны линзы, используя метод наименьших квадратов. (О методе наименьших квадратов можно прочитать в Методических указаниях [2]). Считая, что зависимость $y(x)$ является линейной: $y = y_0 + \bar{R}x$, вычислить коэффициент

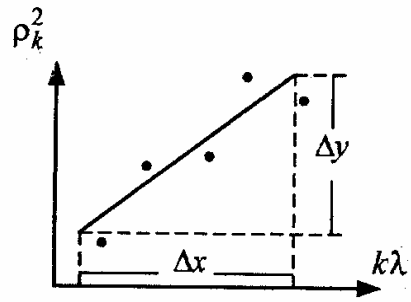


Рис. 5

$$\bar{R} = \frac{n \sum_{k=1}^n x_k y_k - \sum_{k=1}^n x_k \sum_{k=1}^n y_k}{n \sum_{k=1}^n x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2}, \text{ при } n=5,$$

и его дисперсию

$$S_{\bar{R}}^2 = \frac{1}{(n-2)} \left[\frac{n \sum_{k=1}^n y_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n y_k \right)^2}{n \sum_{k=1}^n x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2} - \bar{R}^2 \right].$$

В этих формулах n — число измерений.

5. Задавая определенное значение доверительной вероятности α (самостоятельно или по указанию преподавателя), оценить случайную погрешность

$$\Delta R_{\text{случ}} = t_{\alpha,5} \frac{S_R}{\sqrt{5}},$$

где $t_{\alpha,5}$ — коэффициент Стьюдента.

6. Оценить систематическую погрешность $\Delta R_{\text{сист}}$ для измерения с наибольшим кольцом ($k=5$), считая, что в соответствии с (5) рабочей формулой является $R = \frac{\rho_k^2}{k\lambda}$. В этом случае

$$\Delta R_{\text{сист}} = \bar{R} \sqrt{\left(2 \frac{\Delta \rho_k}{\rho_k} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right)^2}.$$

Если на рабочей установке задана частота, то $\Delta \lambda / \lambda$ заменяется на $\Delta \nu / \nu$.

7. Определить полную погрешность

$$\Delta R = \sqrt{\Delta R_{\text{случ}}^2 + \Delta R_{\text{сист}}^2}.$$

8. Записать окончательный результат в виде $R = \bar{R} \pm \Delta R$, указав наряду с доверительным интервалом относительную погрешность $\delta R = \frac{\Delta R}{\bar{R}}$.

Контрольные вопросы

1. Что такое интерференция света?
2. Какие волны называются когерентными?
3. Расскажите об интерференции света на тонком слое.
4. Что такое кольца Ньютона?

Работа 7.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ И СТЕПЕНИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы

Изучение волновых свойств света (дифракции, интерференции, поляризации). Практическое знакомство с лазером как с источником светового излучения.

Введение

Дифракция – это огибание волнами препятствий, не связанное с отражением или преломлением волн. Дифракция проявляется особенно отчетливо, когда размеры препятствий соизмеримы с длиной волны.

Рассмотрим дифракционную решетку (рис. 1), т. е. спектральный прибор, состоящий из равноотстоящих друг от друга прозрачных промежутков (щелей) шириной a , разделенных непрозрачными промежутками (штрихами) шириной b . Величина $d = a + b$ называется периодом, или постоянной решетки.

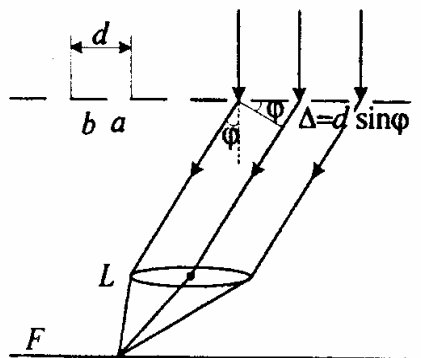


Рис. 1

Предположим, что на дифракционную решетку нормально падает плоская монохроматическая волна с длиной волны λ . Так как размеры щелей a соизмеримы с длиной волны света λ , на каждой щели происходит дифракция, и волны распространяются после решетки в различных на-

правлениях. Лучи, отклоняющиеся под одним и тем же углом дифракции φ , с помощью линзы L собираются в одной точке фокальной плоскости F , где происходит их интерференция. Волны от соседних щелей, распространяющиеся под углом φ , имеют разность хода $\Delta = d \sin \varphi$ (можно

показать, что линза не вносит дополнительного вклада в разность хода лучей). Взаимное усиление волн будет происходить тогда, когда эта величина равна целому числу длин волн. Отсюда вытекает условие возникновения главных максимумов:

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots, \quad (1)$$

где целое число k называется порядком спектра. На экране, расположенном в фокальной плоскости линзы, наблюдается интерференционная картина – светлые полосы одного цвета. Если на решетку падает свет, имеющий сложный спектральный состав, то, как следует из (1), волны с различными значениями λ будут усиливаться при различных углах φ и каждому значению k на экране будет соответствовать система интерференционных полос, окрашенных в различные цвета.

Угловой дисперсией спектрального прибора называется величина, характеризующая угловое расстояние между двумя линиями, разность длин волн которых $d\lambda = 1 \text{ \AA}$

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda}. \quad (2)$$

В случае дифракционной решетки, исходя из (1), для угловой дисперсии можно получить выражение

$$D = \frac{k}{d \cos \varphi}. \quad (3)$$

Спектральные линии, получаемые с помощью дифракционной решетки, имеют конечную ширину. Поэтому линии с близкими длинами волн могут слиться в одну линию. Разрешающая способность (т. е. способность раздельно формировать близкие спектральные линии) дифракционной решетки определяется соотношением

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad \left(\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}, \quad \Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \right),$$

где λ_1 и λ_2 – длины волн двух наиболее близких друг к другу спектральных линий, которые решетка может разрешить (позволяет наблюдать раздельно). Можно показать, что

$$R = kN, \quad (4)$$

где k – порядок спектра; N – полное число штрихов решетки.

Две соседние спектральные линии с длинами волн λ_1 и λ_2 будут различимыми, если выполняется условие $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \leq kN$.

Для большинства источников характерно испускание естественного света. В таком свете равновероятны любые направления колебаний вектора \vec{E} в плоскости, перпендикулярной вектору скорости света \vec{V} . Это обусловлено тем, что излучение создается большим числом атомов, каждый из ко-

торых излучает независимо от других, т. е. излучения отдельных атомов не согласованы ни по фазе, ни по поляризации.

Если вектор \vec{E} (и соответственно вектор \vec{H} , который ему перпендикулярен) совершает колебания строго в одном направлении (перпендикулярном вектору \vec{V}), то такой свет называется линейно-поляризованным (плоскополяризованным). Для линейно-поляризованного света плоскость, содержащую вектор \vec{E} и луч, называют плоскостью поляризации. Если свет не является линейно поляризованным, но существует преимущественное направление колебаний вектора \vec{E} , то такой свет называется частично поляризованным.

Поляризатором называется устройство, которое преобразует любое излучение в линейно поляризованное. Плоскость, в которой происходят колебания вектора \vec{E} на выходе из поляризатора, называется главной плоскостью поляризатора.

Если на поляризатор падает естественный свет интенсивностью I_0 , то интенсивность света на выходе из поляризатора составляет половину I_0 (колебания, перпендикулярные главной плоскости поляризатора, поглощаются поляризатором)

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0$$

и при повороте поляризатора вокруг луча не изменяется.

Если на поляризатор падает линейно поляризованный свет интенсивностью I_1 , то интенсивность света на выходе из поляризатора I_2 изменяется согласно закону Малюса

$$I_2 = I_1 \cos^2 \varphi. \quad (5)$$

Здесь φ – угол между направлениями колебаний вектора \vec{E} на входе и на выходе поляризатора. Другими словами, φ – это угол между плоскостью поляризации света, падающего на поляризатор и главной плоскостью поляризатора. При повороте поляризатора I_2 изменяется от 0 до I_1 .

Если на поляризатор падает частично поляризованный свет интенсивностью I_1 , то при повороте поляризатора интенсивность света I_2 на его выходе изменяется от I_{\min} до I_{\max} (причем $0 \leq I_{\min} < I_{\max} \leq I_1$) и степень поляризации P частично поляризованного света определяется соотношением

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (6)$$

Для естественного света $P = 0$, а для линейно-поляризованного $P = 1$.

Если поляризатор используется для исследования характера поляризации света, в том числе для определения степени поляризации света, такой поляризатор называют анализатором.

Описание лабораторной установки. Метод измерений

В данной работе для исследования различных явлений волновой оптики используется лазер. Излучение лазера отличается рядом замечательных особенностей, в том числе строгой монохроматичностью, высокой степенью поляризации и малой расходимостью пучка, благодаря чему достигается большая концентрация энергии в луче.

Установка для исследования явлений волновой оптики состоит из следующих основных частей: 1) источника излучения – лазера; 2) оптического устройства для исследования света, помещенного на пути лазерного луча; 3) прибора для регистрации прошедшего излучения.

Работа состоит из двух частей.

В первой части работы на пути луча лазера устанавливается дифракционная решетка (рис. 2).

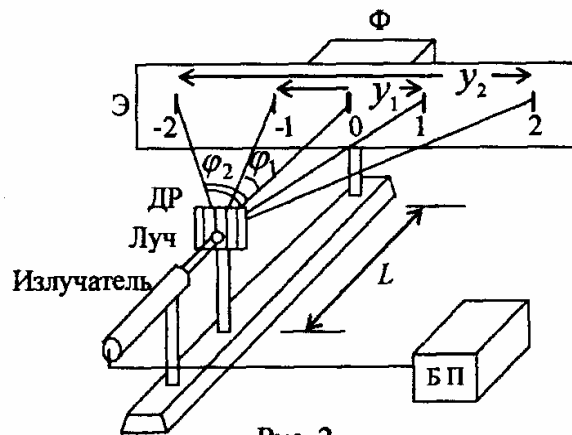
На экране будет наблюдаться дифракционная картина: центральная яркая полоска (максимум нулевого порядка) в том месте, куда приходят неотклоненные лучи, и расположенные симметрично относительно центра два максимума первого порядка, два максимума второго порядка, третьего и т. д. Измерив расстояние L от дифракционной решетки (ДР) до экрана (Э) и расстояние y между левым и правым максимумами одинакового порядка, можно вычислить угол дифракции

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{y}{2L}. \quad (7)$$

Подставив полученное значение φ в формулу для главных максимумов (1), вычисляют длину волны света λ .

Во второй части работы изучается закон Малюса.

Для этого на пути луча лазера вместо решетки помещается анализатор, выполненный из поляроидной пленки (поляроид). Приемником света в этом эксперименте является кремниевый фотоэлемент (Φ на рис. 2). Чтобы предотвратить попадание на фотоэлемент постороннего излучения, он смонтирован в светонепроницаемом кожухе, имеющем входное окно диаметром в несколько миллиметров. Фототок, возникающий в фотоэлементе под действием света, измеряется чувствительным гальванометром. Поскольку в опыте нужны не абсолютные значения интенсивности света, а их относительные величины, вместо интенсивности света измеряется величина, ей пропорциональная, – сила тока J . Вращая анализатор вокруг луча ла-



зера, определяют токи, соответствующие минимальной и максимальной интенсивности прошедшего света и по формуле (6) рассчитывают степень поляризации лазерного излучения.

Для проверки закона Малюса (5) нужно экспериментально определить относительные интенсивности света, прошедшего через анализатор, при различных углах φ между вектором \vec{E} в луче, выходящем из лазера, и главной плоскостью анализатора. Для этого измеряют ток в цепи фотозлемента при различных положениях анализатора, фиксируемых по шкале поворотного устройства.

Порядок выполнения работы

Часть 1

1. Запишите параметры дифракционной решетки: период d и длину l . Они указаны на рабочем месте.

2. Включите лазер. Для этого достаточно поставить тумблер на блоке питания (БП на рис. 2) в положение «ВКЛ.».

3. Измерьте ширину лазерного пятна на экране $l_{\text{раб}}$.

4. Поставьте на пути лазерного луча дифракционную решетку. На экране должна наблюдаться дифракционная картина. Рабочая поверхность решетки и плоскость экрана должны быть выставлены так, чтобы луч, идущий от лазера, падал на них по нормали.

5. Измерьте расстояние y_1 между левым и правым максимумами первого порядка, y_2 – между максимумами второго порядка и y_3 – между максимумами третьего порядка.

Измерьте расстояние L от решетки до экрана.

6. Повторите измерения п. 5 еще при двух значениях L . Результаты этих прямых измерений занесите в табл. 1.

Таблица 1

№ измерения	L	y_1	$\sin \varphi_1$	λ	y_2	$\sin \varphi_2$	λ	y_3	$\sin \varphi_3$	λ	$\lambda_{\text{ср}}$
1											
2											
3											

Часть 2

1. Убрав дифракционную решетку, переверните экран, подставив под луч лазера входное окно фотозлемента. Подключите фотозлемент к гальванометру.

2. Регулируя по высоте положение фотозлемента и при необходимости осторожно смещая лазер вправо или влево, добейтесь оптимального попадания светового луча в окно фотозлемента. При этом гальванометр должен

показывать ток, близкий к максимальному для данного гальванометра.

3. Поставьте на пути лазерного луча поляроид с поворотным устройством. В данном опыте он будет играть роль анализатора. Вращая анализатор вокруг луча лазера, определите максимальное J_{\max} и минимальное J_{\min} значения фототока. Измерения сделайте 3 раза и результаты запишите в табл. 2.

Таблица 2

4. Зафиксируйте по шкале поворотного устройства такое положение анализатора, при котором интенсивность прошедшего света максимальна. При этом угол φ между вектором \vec{E} в падающем на анализатор луче и главной плоскостью анализатора равен нулю.

№ измерения	J_{\max}	J_{\min}	P
1			
2			
3			
Среднее			

Поворачивая анализатор, изменяйте угол φ от 0° до 180° через каждые 10° . Для каждого угла φ измерьте фототок J . Результаты измерений запишите в табл. 3.

Таблица 3

φ	0°	10°	20°	...	90°	...	180°
J							
$\left(\frac{J}{J_{\max}}\right)_{\text{эксп}}$							
$\cos^2 \varphi$							

Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 1 вычислите для каждого порядка $k = 1, 2, 3$ (при каждом значении L) длину волны света лазера и найдите среднее значение

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_9}{9}.$$

2. Рассчитайте абсолютную и относительную погрешности длины волны λ .

3. Определите угловую дисперсию D решетки по формуле (3) для первого и второго порядка.

4. Найдите разрешающую способность решетки для первого и второго порядка ($k = 1$ и $k = 2$). Ее максимально достижимое значение R_{\max} и значение, реализованное в данном эксперименте $R_{\text{раб}}$, в соответствии с формулой (4) можно вычислить следующим образом:

$$R_{\max} = kN = k \frac{l}{d}, \quad R_{\text{раб}} = kN_{\text{раб}} = k \frac{l_{\text{раб}}}{d},$$

где l – полная длина решетки (на ней укладываются N щелей); $l_{\text{раб}}$ – длина

освещенной части решетки (на ней укладываются $N_{\text{раб}}$ щелей).

5. По данным табл. 2 вычислите степень поляризации P лазерного луча.

6. По данным табл. 3 постройте на одном графике две кривые:

$$f_1(\varphi) = \left(\frac{J}{J_{\text{max}}} \right)_{\text{эксп}} \quad \text{и} \quad f_2(\varphi) = \left(\frac{I}{I_{\text{max}}} \right)_{\text{теор}} = \cos^2 \varphi.$$

Графики постройте в декартовых и в полярных координатах.

Контрольные вопросы

1. Опишите структуру дифракционной картины при нормальном падении света на дифракционную решетку.

2. Дайте определение угловой дисперсии спектрального прибора. Укажите ее зависимость от периода дифракционной решетки и от угла дифракции.

3. Дайте определение разрешающей способности спектрального прибора. Укажите ее зависимость от полного числа щелей в дифракционной решетке.

4. Объясните отличие линейно-поляризованного света от естественного.

5. Сформулируйте закон Малюса.

Работа 7.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДНОГО РАСТВОРА САХАРА С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯРИМЕТРА

Цель работы

Изучение явления поляризации света и прохождения света через оптически активные вещества.

Введение

Большинство источников света (Солнце, лампы накаливания и др.) испускают естественный свет. Естественный (неполяризованный) свет – это оптическое излучение с быстро и беспорядочно изменяющимися направлениями колебаний напряженностей электромагнитного поля. В таком свете все направления колебаний вектора \vec{E} , перпендикулярные лучу, равновероятны.

Естественный свет можно преобразовать в линейно-поляризованный (плоскополяризованный), т. е. в такой свет, в котором световой вектор в процессе колебаний все время параллелен одному и тому же направлению.

Плоскость, проходящая через направление колебаний светового вектора и световой луч, называется плоскостью поляризации.

Прибор для получения плоскополяризованного света из естественного называется поляризатором. Плоскость поляризации света, выходящего из поляризатора, называется главной плоскостью поляризатора.

Наиболее распространены поляризаторы двух типов: призмный (призма Николя) и пленочный (поляроид). В основе их действия лежат такие явления, как двойное лучепреломление, полное внутреннее отражение и дихроизм [1].

Рассмотрим вопрос об изменении интенсивности естественного света при его последовательном прохождении через два поляризатора.

После прохождения через первый поляризатор свет становится плоскополяризованным, а его интенсивность $I_1 = \frac{I_0}{2}$, где I_0 – интенсивность падающего (естественного) света. Второй поляризатор, на который падает уже поляризованный свет, называют анализатором.

Интенсивность I_2 света, выходящего из анализатора, определяется законом Малюса: $I_2 = I_1 \cos^2 \varphi$, где φ – угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора. При $\varphi = 0$ анализатор полностью пропускает падающий на него свет ($I_2 = I_1$), а при $\varphi = 90^\circ$ свет полностью задерживается ($I_2 = 0$). Два поляризатора, главные плоскости которых взаимно перпендикулярны, называются скрещенными.

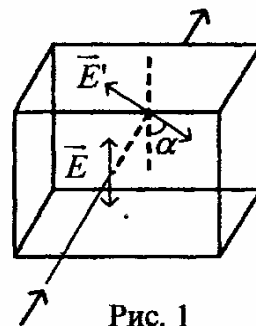


Рис. 1

В природе существует много веществ, твердых и жидких, обладающих свойством вращать плоскость поляризации проходящего через них линейно поляризованного света. Такие вещества называются *оптически активными*.

Явление вращения плоскости поляризации света заключается в следующем. Луч поляризованного света, падающий перпендикулярно на поверхность оптически активного изотропного тела, выходит из него, не меняя направления, однако плоскость колебаний светового вектора оказывается повернутой вокруг луча относительно исходного направления на некоторый угол α (рис. 1).

Вращение плоскости поляризации можно объяснить, представив линейно поляризованную световую волну как сумму двух циркулярно поляризованных волн, распространяющихся в одном направлении, в которых векторы \vec{E}_1 и \vec{E}_2 с одинаковыми модулями ($|\vec{E}_1| = |\vec{E}_2|$) вращаются с одинаковой угловой скоростью ω в противоположных направлениях (рис. 2).

Если такие циркулярно поляризованные волны распространяются с одинаковыми скоростями, то в каждой точке вещества получается результирующее колебание, имеющее всюду одно и то же направление (вертикальное на рис. 2).

Представим теперь, что эти две циркулярно поляризованные волны распространяются в оптически активном веществе. Вектор амплитуды колебаний в падающей на кристалл плоскополяризованной волне \vec{E} разложим на два вектора: \vec{E}_1 и \vec{E}_2 , из которых первый вращается направо, а второй налево.

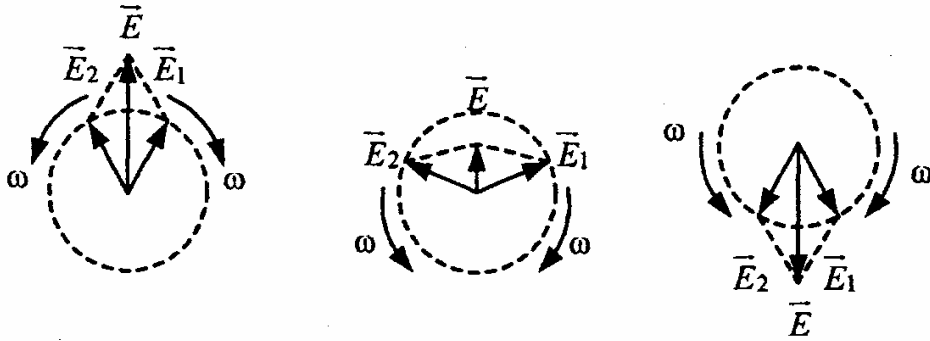


Рис. 2

Скорости распространения право- и лево- циркулярно поляризованных волн в оптически активном кристалле разные. Поэтому после того как свет пройдет толщину кристалла l , волна \vec{E}_1 изменит фазу на $\alpha_1 = 2\pi \frac{l}{\lambda_1}$, а вол-

на \vec{E}_2 — на $\alpha_2 = 2\pi \frac{l}{\lambda_2}$, где λ_1 и λ_2 — длины волн в кристалле, соответствующие обоим видам колебаний (длиной волны такого света называется кратчайшее расстояние между двумя точками луча, в которых световой вектор в каждый момент времени направлен одинаково).

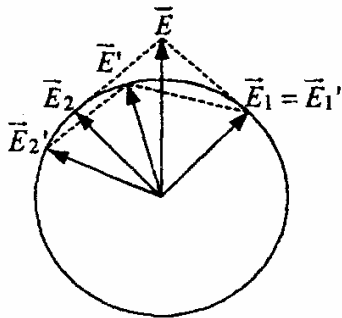


Рис. 3

Предположим, что толщина пластинки такова, что угол α_1 кратен 2π . Тогда вектор \vec{E}_1' займет свое прежнее положение, а вектор \vec{E}_2' , для которого $\alpha_2 \neq \alpha_1$, займет некоторое новое положение, повернутое относительно старого на угол

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 = 2\pi l \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right).$$

Результирующий вектор займет также новое положение \vec{E}' , повернутое относительно \vec{E} на угол

$$\alpha = \frac{\Delta\alpha}{2} = \pi l \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right). \quad (1)$$

Введем показатели преломления n_1 и n_2 для волн, право- и лево- цир-

кулярно поляризованных волн, тогда $\lambda_1 = \frac{\lambda_0}{n_1}$ и $\lambda_2 = \frac{\lambda_0}{n_2}$, где λ_0 – длина волны рассматриваемого света в пустоте. Подставляя эти значения λ_1 и λ_2 в (1), найдем

$$\alpha = \pi \frac{l}{\lambda_0} (n_1 - n_2).$$

Таким образом, угол поворота плоскости поляризации α определяется разностью показателей преломления n_1 и n_2 для право- и лево-циркулярно поляризованных волн.

Описание лабораторной установки. Метод измерений

Одним из оптически активных веществ (ОАВ) является водный раствор сахара ($C_{12}H_{22}O_{11}$). Для определения концентрации используется явление вращения плоскости поляризации. Если луч поляризованного света пройдет через сосуд с водным раствором сахара, то плоскость поляризации повернется вокруг луча на угол α .

В однородном растворе угол α поворота вектора \vec{E} удовлетворяет следующему соотношению:

$$\alpha = kcl, \quad (2)$$

где c – концентрация раствора; l – длина пути луча в растворе; k – коэффициент пропорциональности.

Задачей настоящей работы является определение концентрации водного раствора сахара.

Работа выполняется на приборе, называемом круговым поляриметром. Схема поляриметра представлена на рис. 4. Лучи света от источника S , установленного в главном фокусе линзы $Л$, проходят через желтый светофильтр Φ и попадают в поляризатор Π .

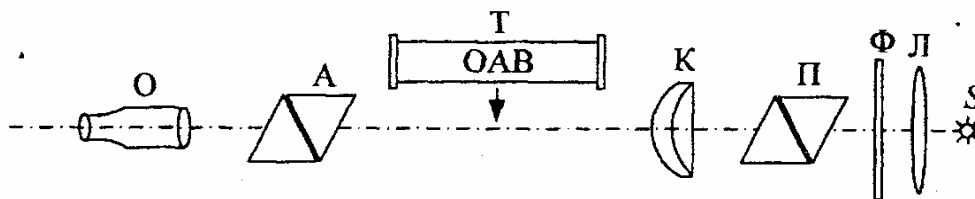


Рис. 4

Пройдя через поляризатор Π , свет оказывается поляризованным в некоторой плоскости. За поляризатором установлена кварцевая пластинка $К$, которая занимает половину поля зрения. В результате этого одна половина светового потока проходит через кварцевую пластинку $К$ и анализатор $А$, а другая половина – только через анализатор $А$. Кварц является оптически активным веществом, поэтому плоскости поляризации левых и правых пучков световых лучей оказываются различными. Соответствующие векто-

ра $\vec{E}_{\text{прав}}$ и $\vec{E}_{\text{лев}}$ образуют разные углы $\varphi_{\text{прав}} \neq \varphi_{\text{лев}}$ с главной («пропускающей») плоскостью анализатора А. При этом согласно закону Малюса интенсивность света, дошедшего до наблюдателя, окажется разной $I_{\text{прав}} \neq I_{\text{лев}}$. Поле зрения, наблюдаемое в окуляр О, разделяется вследствие этого на две смежные части (рис. 5, а, в). Поворачивая анализатор вокруг оптической оси и наблюдая при этом изменение контраста в поле зрения, можно с большой точностью выставить анализатор в так называемое «нулевое положение», при котором интенсивности обеих частей поля зрения одинаковы $I_{\text{прав}} = I_{\text{лев}}$ (рис. 5, б). Легко понять, что это происходит тогда, когда главная плоскость анализатора установлена строго посередине между векторами $\vec{E}_{\text{прав}}$ и $\vec{E}_{\text{лев}}$.

Примечание. Можно в упрощенном поляриметре без кварцевой пластины наблюдать равномерно освещенное поле зрения. Затем путем поворота анализатора искать в качестве нулевого положения такое состояние, когда все поле зрения окажется максимально затемненным. Ясно, что это случится при угле 90° между главными плоскостями поляризатора и анализатора (два поляризатора находятся в скрещенном состоянии). Но субъективная ошибка при этом составляет приблизительно $\pm 5^\circ$. Для повышения точности до значений $\pm 0,05^\circ$ созданы полутеневые поляриметры, такие как используемый в нашей работе поляриметр СМ-3. В них используется свойство человеческого глаза с высокой точностью сравнивать интенсивности двух одновременно наблюдаемых полей.

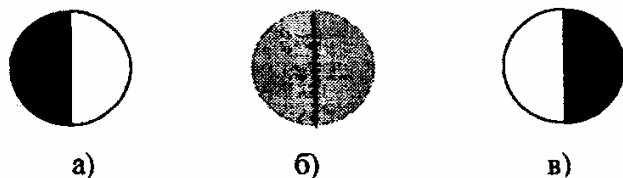


Рис. 5

И наконец, главное: как измеряют угол α , на который повернулся вектор \vec{E} в результате прохождения света сквозь ОАВ? Сначала поляриметр выставляют в нулевое положение в отсутствие трубки с ОАВ, затем помещают

между поляризатором и анализатором трубку с ОАВ и, поворачивая анализатор, восстанавливают нарушенное равенство интенсивностей в поле зрения окуляра, т. е. находят новое нулевое положение. Угол, на который при этом пришлось повернуть анализатор, и есть искомый угол α .

Порядок выполнения работы

1. Включить источник света. Подождать 5 минут, чтобы лампа прогрелась. Через окуляр поляриметра разглядеть фотометрическое поле. При этом окуляр следует установить вращательным движением так, чтобы видеть *резкое* изображение разделяющей линии двойного поля зрения.
2. Плавным вращением анализатора добиться равномерного затемне-

ния всего поля зрения. Сделать отсчет α_0 делений основной шкалы и нониуса через лупу № 1 (слева от окуляра). Измерения провести не менее трех раз.

3. Поместить в камеру прибора трубку с раствором сахара известной концентрации C_1 и восстановить резкость изображения, вращая корпус окуляра. Поворотом анализатора добиться равномерного затемнения двойного поля зрения. Снять показания α' по основной шкале и нониусу. Провести опыт не менее трех раз. Рассчитать среднее значение α' .

4. Выразить угол поворота плоскости поляризации света как разность отсчетов α' и α_0

$$\alpha_1 = \alpha' - \alpha_0.$$

5. Повторить измерения с другой трубкой, содержащей раствор неизвестной концентрации C_2 .

6. Вычислить угол поворота плоскости поляризации $\alpha_2 = \alpha'' - \alpha_0$ в этой трубке и определить неизвестную концентрацию по формуле (3), которая получается из формулы (2):

$$C_2 = C_1 \cdot \frac{\ell_1}{\ell_2} \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_1}. \quad (3)$$

Здесь ℓ_1 – длина трубки с раствором известной концентрации C_1 ;

ℓ_2 – длина трубки с раствором неизвестной концентрации C_2 .

Данные измерений и вычислений записать в табл. 1.

7. Рассчитать абсолютную и относительную погрешности в определении концентрации раствора.

Таблица 1

Без трубки				Трубка с раствором известной концентрации					Трубка с раствором неизвестной концентрации						
α_0 , град				α' , град				α_1 , град	C_1 , %	α'' , град				α_2 , град	C_2 , %
1	2	3	ср	1	2	3	ср			1	2	3	ср		

Контрольные вопросы

1. Что колеблется в световой волне?
2. Продольной или поперечной является: а) световая волна; б) радиоволна?
3. Чем отличается плоскополяризованный свет от естественного света?
4. Какой угол (угол между чем и чем) фигурирует в законе Малюса?

5. Когда два поляризатора называют скрещенными?
6. Какое вещество называют оптически активным веществом?
7. Чем поляриметр полутеневого (с кварцевой пластинкой) лучше поляриметра с ровно освещенным полем зрения (без кварцевой пластинки)?

Работа 7.5

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ДИСПЕРСИИ СВЕТА ПРИ ПОМОЩИ ГОНИОМЕТРА

Цель работы

Исследование зависимости показателя преломления стекла от длины волны света и знакомство с работой гониометра.

Введение

Дисперсией света называется зависимость показателя преломления вещества от длины световой волны. Рассмотрим плоскую монохроматическую волну с частотой ω , длиной волны λ , распространяющуюся вдоль оси Z : $E(z, t) = E_0 \cos(\omega t - kz)$, где ω — циклическая частота, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число.

Фазовая скорость v — это скорость распространения поверхности постоянной фазы:

$$\varphi(z, t) = \omega t - kz = \text{const.} \quad (1)$$

Эту скорость найдем, продифференцировав (1) по времени t :

$$v = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k}. \quad (2)$$

Однако любая реальная волна (волновой импульс) не является монохроматической, она представляет собой суперпозицию волн, близких друг другу по длине волны, т. е. группу волн или волновой пакет. При этом скорость распространения точки с максимальной амплитудой в этой группе волн называется групповой скоростью U .

В теории дисперсии хорошо известна связь между групповой и фазовой скоростями:

$$U = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}. \quad (3)$$

Из определения показателя преломления как отношения скорости света в вакууме c к скорости света в веществе $n = \frac{c}{v}$ следует:

$$\frac{dv}{d\lambda} = -\frac{c}{n^2} \frac{dn}{d\lambda}.$$

Подставим это выражение в формулу (3):

$$U = v \left(1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right). \quad (4)$$

Дисперсией вещества называется быстрота изменения показателя преломления при изменении длины волн:

$$D = \frac{dn}{d\lambda}. \quad (5)$$

Если дисперсия отсутствует, фазовая скорость не зависит от длины волны и $\frac{dv}{d\lambda} = 0$, $\frac{dn}{d\lambda} = 0$. Следовательно, $U = v$, т. е. фазовая и групповая скорости совпадают, и волновой пакет, распространяясь, не меняет своей формы.

При наличии дисперсии $\frac{dv}{d\lambda} \neq 0$ групповая скорость может быть больше или меньше фазовой в зависимости от знака $\frac{dv}{d\lambda}$, и волновой пакет при своем распространении расплывается.

Из формул (3) и (4) следует, что, если $\frac{dv}{d\lambda} > 0$, то $U < v$ и $\frac{dn}{d\lambda} < 0$.

Следовательно, показатель преломления n уменьшается с увеличением длины волны. Эту зависимость n от λ называют нормальной дисперсией. Нормальная дисперсия наблюдается при прохождении света через прозрачные бесцветные среды.

Если вещество поглощает свет в какой-либо области спектра, то в этой области $\frac{dv}{d\lambda} < 0$ (случай аномальной дисперсии).

В настоящей работе экспериментально исследуется нормальная дисперсия света в стеклянной призме. Для каждой спектральной линии, наблюдаемой через эту призму, измеряется свой угол наименьшего отклонения δ_{min} и вычисляется показатель преломления для соответствующей длины волны.

Вывод рабочей формулы

Рассмотрим ход луча монохроматического света через призму, находящуюся в воздухе ($n_{\text{возд}} = 1$). Из рис. 1 видно, что угол отклонения луча δ является внешним углом треугольника ABC и равен:

$$\delta = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2) = \alpha_1 + \alpha_2 - (\beta_1 + \beta_2), \quad (6)$$

где α_1, β_1 и β_2, α_2 – углы падения и преломления луча в точках А и С соответственно. По закону преломления света:

$$\sin \alpha_1 = n \sin \beta_1, \quad (7)$$

$$\sin \alpha_2 = n \sin \beta_2. \quad (8)$$

Из треугольника ADC преломляющий угол призмы равен

$$\gamma = \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \beta_1 \right) - \left(\frac{\pi}{2} - \beta_2 \right) = \beta_1 + \beta_2. \quad (9)$$

С учетом (9) формулу (6) можно записать в виде

$$\delta = \alpha_1 + \alpha_2 - \gamma. \quad (10)$$

Для определения угла наименьшего отклонения луча необходимо решить задачу на экстремум. Из уравнений (7)–(10) следует, что задание одного из углов $\alpha_1, \beta_1, \beta_2, \alpha_2$ – определяет значения остальных. Удобно в качестве независимой переменной взять угол β_1 .

Вычислим производную угла отклонения δ по β_1 :

$$\frac{d\delta}{d\beta_1} = \frac{d\alpha_1}{d\beta_1} + \frac{d\alpha_2}{d\beta_1} = \frac{d\alpha_1}{d\beta_1} + \frac{d\alpha_2}{d\beta_2} \frac{d\beta_2}{d\beta_1}. \quad (11)$$

Из (7)–(9) получаем

$$\frac{d\alpha_1}{d\beta_1} = n \frac{\cos \beta_1}{\cos \alpha_1}, \quad (7')$$

$$\frac{d\alpha_2}{d\beta_2} = n \frac{\cos \beta_2}{\cos \alpha_2}, \quad (8')$$

$$\frac{d\beta_2}{d\beta_1} = -1. \quad (9')$$

Подставляя (7')–(9') в (11), получаем выражение для производной

$$\frac{d\delta}{d\beta_1} = n \left(\frac{\cos \beta_1}{\cos \alpha_1} - \frac{\cos \beta_2}{\cos \alpha_2} \right). \quad (11')$$

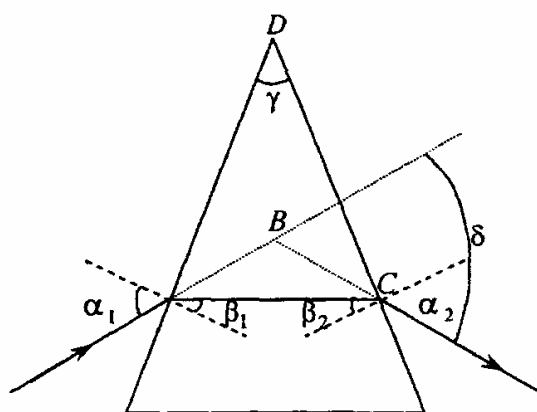


Рис. 1

Производная обращается в 0 при симметричном ходе лучей: $\alpha_1 = \alpha_2$, $\beta_1 = \beta_2$. Для выяснения характера экстремума нужно вычислить вторую производную. Опуская промежуточные выкладки, приводим результат:

$$\frac{d^2\delta}{d\beta_1^2} = n \sum_{i=1}^2 \frac{\sin \beta_i}{\cos^3 \alpha_i} (n^2 \cos^2 \beta_i - \cos^2 \alpha_i). \quad (12)$$

Если $n > 1$, то $\beta_i < \alpha_i$, $\cos \beta_i > \cos \alpha_i$ и выражение (12) положительно. Таким образом, при симметричном ходе лучей достигается минимум угла отклонения, других экстремумов нет.

При симметричном ходе луча в призме из формул (9) и (10) следует

$$\beta_1 = \beta_2 = \frac{\gamma}{2} \quad \text{и} \quad \alpha_1 = \alpha_2 = \frac{1}{2}(\gamma + \delta_{\min}).$$

Принимая во внимание эти соотношения, из (7) или (8) получим формулу для вычисления показателя преломления стекла для данной длины волны:

$$n = \frac{\sin \frac{\gamma + \delta_{\min}}{2}}{\sin \frac{\gamma}{2}}. \quad (13)$$

Описание лабораторной установки

Исследование явления дисперсии в настоящей работе производится с помощью гониометра ГС-5, общий вид которого изображен на рис. 2.

Гониометр состоит из следующих основных частей: неподвижного основания 1; подвижного корпуса – алидады 2 и столика 3, которые могут поворачиваться относительно вертикальной оси гониометра независимо друг от друга; коллиматора 4, предназначенного для получения параллельного пучка света и закрепленного неподвижно относительно основания; зрительной трубы 5, прикрепленной к алидаде, и отсчетного микроскопа 6.

Коллиматор состоит из объектива, в главном фокусе которого находится щель, освещаемая источником света. Ширину щели можно регулировать маховичком 7. Таким образом, на выходе коллиматора получается параллельный пучок света. Фокусировка зрительной трубы и коллиматора производится маховичками 8 и 9 соответственно. Маховичок 9 на рис. 2 не виден, так как находится на другой стороне коллиматора.

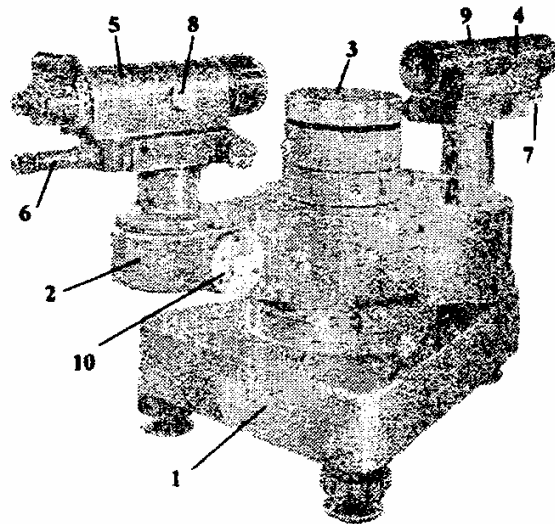


Рис. 2

Зрительная труба снабжена окуляром с крестом нитей. При определении углов гониометром вертикальную нить совмещают с изображением щели коллиматора либо с определенной спектральной линией и снимают показания по отсчетному микроскопу, поле зрения которого изображено на рис. 3, а и б.

Левое окно отсчетного микроскопа служит для измерения градусов и десятков минут. Чтобы снять отсчет по лимбу, необходимо повернуть маховичок оптического микрометра 10 настолько, чтобы верхние и нижние

штрихи лимба в левом окне точно совместились. Число градусов будет равно видимой ближайшей левой от вертикального индекса цифре верхней шкалы. На рис. 3, а это 0° ; на рис. 3, б это 5° .

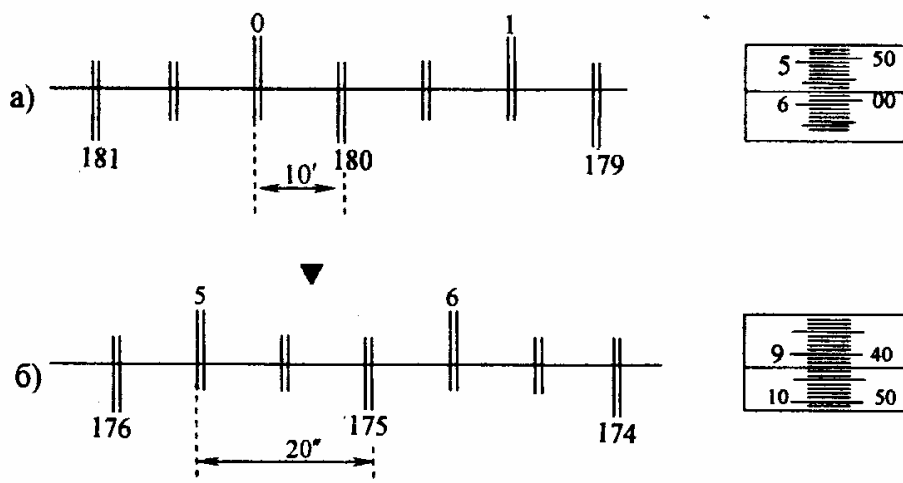


Рис. 3

Число десятков минут равно числу интервалов, заключенных между верхним штрихом, который соответствует отсчитанному числу градусов, и нижним оцифрованным штрихом, отличающимся от верхнего на 180° . На рис. 3, а это 1 интервал, т. е. $10'$; на рис. 3, б это 2 интервала, т. е. $20''$.

Число единиц минут отсчитывается в правом окне по левой шкале. Правая шкала правого окна дает отсчет десятков и единиц секунд. Измерения в правом окне производятся относительно неподвижного горизонтального индекса. Таким образом, показания отсчетного микроскопа следующие: $0^\circ 15' 58''$ (рис. 3, а) и $5^\circ 29' 43''$ (рис. 3, б).

Порядок выполнения работы

1. Для определения положения неотклоненного луча N_0 надо, не устанавливая на столик гониометра призму, расположить зрительную трубу против коллиматора, получить резкое изображение щели коллиматора, совместить это изображение с нитью и снять отсчет N_0 . Измерение N_0 сделать не менее трех раз и результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

№ измерения	N_0	N_1	N_2	$\gamma = \frac{1}{2} N_1 - N_2 $

2. Для определения преломляющего угла призмы γ установите на столик гониометра призму преломляющим углом к коллиматору (рис. 4). По-

ворачивая зрительную трубу, найдите изображение щели коллиматора при отражении луча сначала от одной грани призмы (положение зрительной трубы I) и снимите отсчет N_1 , потом от другой грани (положение II) и снимите отсчет N_2 . Измерения N_1 и N_2 надо сделать не менее трех раз и результаты занести в табл. 1. Можно показать, что $|N_1 - N_2| = 2\gamma$, поэтому преломляющий угол призмы γ может быть вычислен по формуле

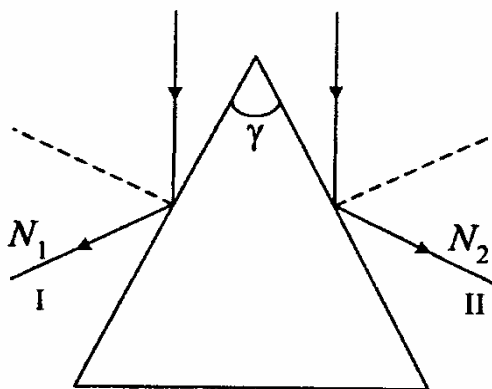


Рис. 4

$$\gamma = \frac{1}{2}|N_1 - N_2|. \quad (14)$$

3. Угол наименьшего отклонения δ_{\min} определяется разностью между отсчетами N_0 и N_3 (рис. 5). Для установки призмы в положение наименьшего отклонения поставьте призму так, чтобы свет из коллиматора падал на грань призмы под углом $10-20^\circ$.

3. Угол наименьшего отклонения δ_{\min} определяется разностью между отсчетами N_0 и N_3 (рис. 5). Для установки призмы в положение наименьшего отклонения поставьте призму так, чтобы свет из коллиматора падал на грань призмы под углом $10-20^\circ$.

Зрительную трубу наведите на какую-нибудь одну линию спектра, даваемого призмой. Медленно поворачивая столик с призмой в направлении уменьшения угла отклонения δ , следите за движением спектра и в то же время перемещайте зрительную трубу, чтобы спектральная линия не ушла из поля зрения. При некотором положении призмы спектр остановится и затем начнет двигаться в обратную сторону, т. е. в сторону увеличения δ . Остановка спектра показывает, что призма находится в положении наименьшего отклонения. Убедившись, что это положение найдено, сделайте отсчет N_3 , соответствующий углу наименьшего отклонения δ_{\min} . Измерения сделайте не менее трех раз и запишите в табл. 2. Угол наименьшего отклонения определите по формуле:

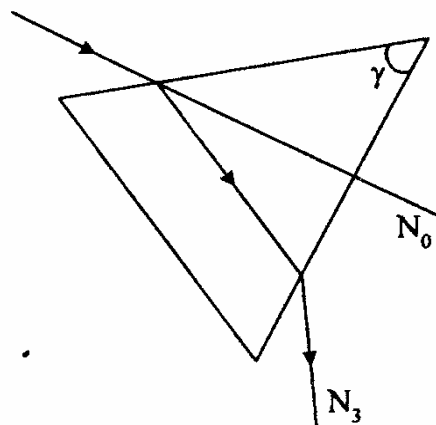


Рис. 5

$$\delta_{\min} = |N_{\text{ср3}} - N_{\text{ср0}}|.$$

4. Измерения, указанные в п. 3, сделайте для линий спектра, приведенных на рабочем месте.

Таблица 2

№ измерения	λ	N_3			$N_{\text{ср3}}$	δ_{\min}	n
		1	2	3			

Задание к работе

1. Докажите формулу (14).
2. По формуле (13) определите показатели преломления стекла для всех спектральных линий, результаты расчета занесите в табл. 2
3. По данным вычислений постройте график $n(\lambda)$. Какой дисперсии (нормальной или аномальной) соответствует ваш график?
4. Используя формулу (13), получите выражение для относительной погрешности δn и найдите относительную и абсолютную погрешность показателя преломления для одной из линий спектра.
5. Определите среднюю дисперсию стекла для различных областей спектра $D = \frac{n_i - n_{i+1}}{\lambda_i - \lambda_{i+1}}$, где λ_i, n_i – длина волны и показатель преломления для i -й линии спектра соответственно.
6. Определите фазовые скорости v для всех линий спектра и постройте график зависимости $v(\lambda)$.
7. По графику $v(\lambda)$ определите средние значения $\frac{\Delta v}{\Delta \lambda}$ и групповые скорости $U = v - \lambda \frac{\Delta v}{\Delta \lambda}$ для различных областей спектра.

Контрольные вопросы

1. Что такое показатель преломления? Каков физический смысл этой величины?
2. Нарисуйте ход лучей в призме.
3. В чем заключается явление дисперсии?
4. Изучите порядок выполнения работы.

Работа 7.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И СРЕДНЕЙ ДИСПЕРСИИ ЖИДКОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ РЕФРАКТОМЕТРА АББЕ

Цель работы

Целью работы является: изучение преломления света при переходе из одной среды в другую, ознакомление с принципом работы рефрактометра, определение показателей преломления растворов различных концентраций и средней дисперсии жидкости.

Введение

При прохождении луча света через границу раздела двух сред изменяется направление распространения луча, т. е. луч преломляется. Отношение синуса угла падения луча i к синусу угла преломления r , равное отношению скоростей света в первой и второй средах, носит название относительного показателя преломления второй среды относительно первой (рис. 1):

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2} = n_{21}. \quad (1)$$

Абсолютный показатель преломления равен $n = \frac{c}{V}$ и определяется со-

отношением

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}, \quad (2)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды при соответствующей частоте света, μ – магнитная проницаемость среды, c – скорость распространения света в пустоте, равная $2,998 \cdot 10^8$ м/с, V – скорость распространения света в данной среде. Относительный показатель преломления двух сред связан с абсолютными показателями преломления этих сред соотношением

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

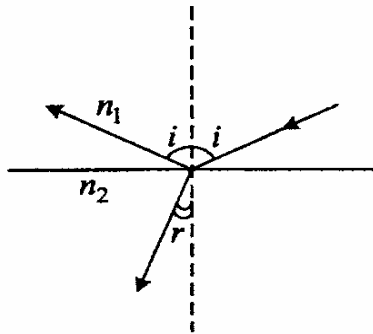


Рис. 1

Среду с большим абсолютным показателем преломления называют оптически более плотной; среду с меньшим абсолютным показателем преломления – оптически менее плотной.

Если луч идет из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную, то при углах падения, больших предельного, происходит явление полного внутреннего отражения (рис. 2, а): луч полностью отражается в исходную среду (луч 3).

Представим, что лучи идут из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную. Пусть лучей много и падают они на границу веществ под всевозможными углами, включая и 90° .

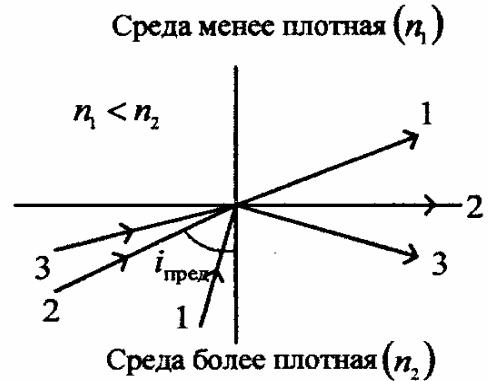


Рис. 2, а

Так бывает при освещении поверхности рассеянным светом. При этом всегда есть область, в которую не заходят преломленные лучи света (рис. 2, б). Привязавшись к границе света и тени, можно измерить $i_{\text{пред}}$.

Применяя формулу (1), получим

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin i_{\text{пред}}} = \frac{1}{\sin i_{\text{пред}}}, \quad n_1 = n_2 \sin i_{\text{пред}}.$$

Таким образом, можно определить показатель преломления исследуемого вещества по предельному углу при переходе света в оптически более плотное вещество (в оптическое стекло), показатель преломления которого известен.

Одно и то же вещество по-разному преломляет лучи красного, зеленого, синего цвета. Это явление зависимости показателя преломления среды от длины волны называется дисперсией света. Для всех бесцветных веществ в видимой части спектра характерна так называемая нормальная дисперсия, когда функция $n(\lambda)$ имеет вид спадающей кри-

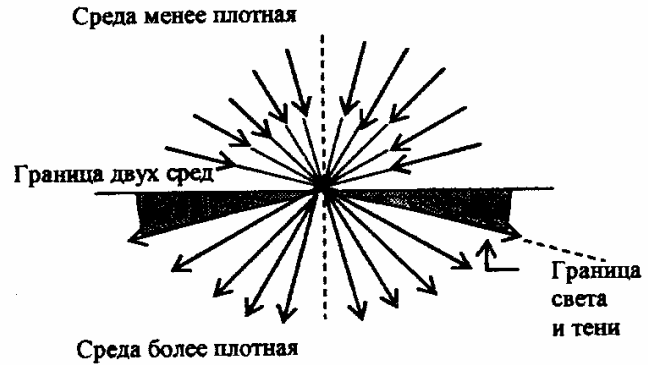


Рис. 2, б

вой с отрицательной производной $\frac{dn}{d\lambda} < 0$ (рис. 3). Физическая величина

$\frac{dn}{d\lambda}$ называется дисперсией вещества, физическая величина $\frac{\Delta n}{\Delta \lambda}$ называется

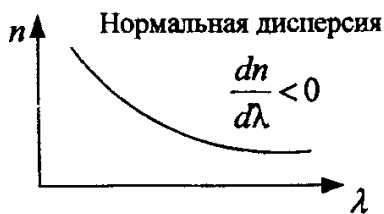


Рис. 3

средней дисперсией вещества на интервале $\Delta \lambda$. Обе эти величины характеризуют быстроту изменения показателя преломления при увеличении длины волны. Из рис. 3 видно, что наклон касательной всюду разный. Это говорит о том, что дисперсия вещества имеет разные значения для различных участков спектра.

В прикладной оптике для сравнения различных веществ отвлекаются от локальных особенностей дисперсионной кривой и усредняют дисперсию в пределах почти всего видимого диапазона. В этом случае средней дисперсией вещества называют величину

$$D = \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} = \frac{n_F - n_C}{\lambda_F - \lambda_C}, \quad (3)$$

где n_F — показатель преломления исследуемого вещества для длины волны $\lambda_F = 4861 \text{ \AA}$ (синий свет), n_C — показатель преломления для длины волны $\lambda_C = 6563 \text{ \AA}$ (красный свет).

Метод измерения

А. Принцип измерения показателя преломления

Несколько капель исследуемой жидкости помещают между двумя гипотенузными гранями призм I и II (рис. 4). Призмы изготовлены из тяжелого стекла, показатель преломления которого больше 1,700.

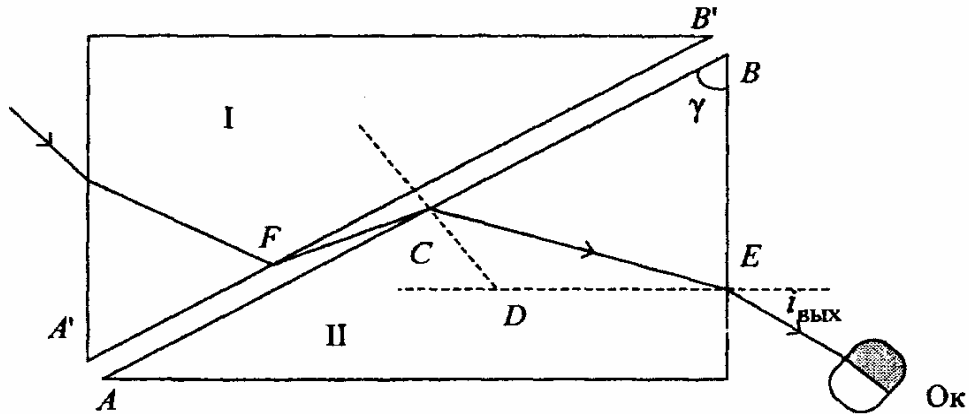


Рис. 4

Свет, рассеянный матовой гранью $A'B'$ верхней призмы, проходит плоскопараллельный слой исследуемой жидкости и падает на полированную грань AB нижней призмы под различными углами в пределах от 0° до 90° . Луч света, угол падения которого равен 90° , называется скользящим лучом. Так как показатель преломления призмы больше, чем показатель преломления жидкости, скользящий световой луч FC , преломляясь на границе жидкость – стекло, пойдет в нижней призме под предельным углом преломления $i_{\text{пред}} = \angle DCE$. Согласно закону преломления

$$\sin i_{\text{пред}} = \frac{n_{\text{ж}}}{n_{\text{ст}}}, \quad (4)$$

где $n_{\text{ж}}$ – показатель преломления исследуемой жидкости, $n_{\text{ст}}$ – показатель преломления стекла, из которого сделана призма II.

В точке E на выходе светового луча из призмы имеем

$$n_{\text{ст}} \sin r = \sin i_{\text{вых}}, \quad (5)$$

где $r = \angle CED$ – угол падения луча CE на выходную грань призмы II, $i_{\text{вых}}$ – угол выхода рассматриваемого луча.

Вышедший из призмы II луч (продолжение скользящего луча в исследуемой жидкости) создает границу света и тени в поле зрения окуляра (Ок на рис. 4).

Преломляющий угол призмы II обозначим γ .

В четырехугольнике $BCDE$ $\angle BCD + \angle BED = 90^\circ + 90^\circ = 180^\circ$, поэтому

$$\gamma + \angle CDE = 180^\circ. \quad (5')$$

С другой стороны, сумма всех углов треугольника CDE может быть представлена в виде

$$i_{\text{пред}} + r + \angle CDE = 180^\circ. \quad (5'')$$

Из (5') и (5'') следует, что

$$\gamma = i_{\text{пред}} + r. \quad (6)$$

Из соотношений (4)–(6) можно получить формулу, связывающую искомый показатель преломления $n_{\text{ж}}$ с наблюдаемым углом $i_{\text{вых}}$:

$$n_{\text{ж}} = \sin \gamma \sqrt{n_{\text{ст}}^2 - \sin^2 i_{\text{вых}}} - \cos \gamma \cdot \sin i_{\text{вых}}. \quad (7)$$

Эта формула была взята за основу при конструировании и градуировке приборов, измеряющих показатель преломления.

Б. Принцип измерения средней дисперсии жидкости

Четкая граница света и тени возникает при наблюдении в монохроматическом свете, т. е. когда на призму I направляется свет одной длины волны. В действительности же установка освещается обычным белым светом (дневным или от лампы). Вследствие дисперсии света в исследуемой жидкости разные длины волн формируют границы в различных местах поля зрения. Поэтому на практике мы видим размытую окрашенную (радужную) границу света и тени. Широкой или узкой окажется эта цветная граница – зависит в частности от численного значения средней дисперсии

$$D = \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} = \frac{n_F - n_C}{\lambda_F - \lambda_C}$$

жидкости, находящейся в зазоре между призмами. Из-

мерив угловую ширину окрашенной границы, можно вычислить D .

Описание прибора (рефрактометра Аббе)

Название прибора связано с явлением рефракции света. Рефракцией называют искривление светового луча в среде с непрерывно изменяющимся показателем преломления. В широком смысле слова рефракция – это преломление. Оптическая схема прибора изображена на рис. 5.

Свет от источника S (дневной или от лампы) направляется в осветительную призму I, проходит тонкий слой исследуемой жидкости и измерительную призму II, затем отражается от измерительного зеркала $Z_{\text{изм}}$ и,

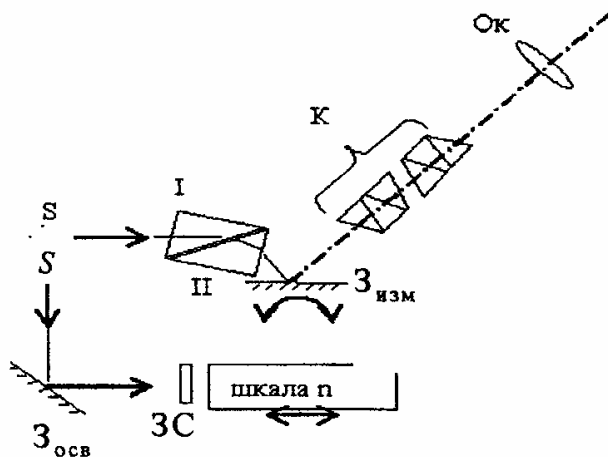


Рис. 5

пройдя через компенсатор К и окуляр Ок, попадает в глаз наблюдателя. Свет от того же источника S, отразившись от осветительного зеркала $Z_{осв}$ и пройдя через зеленое стекло ЗС, освещает шкалу значений показателя преломления n . При повороте измерительного зеркала $Z_{изм}$ в ту или другую сторону шкала n перемещается вправо – влево, как показано на рис. 5.

А. Измерение показателя преломления n

Для нахождения границы света и тени и перемещения ее в поле зрения окуляра необходимо поворачивать измерительное зеркало. Это осуществляется вращением основной ручки-маховика на правой стенке корпуса прибора. Поле зрения окуляра состоит из двух частей. В верхней части на фоне неподвижного перекрестия может перемещаться граница света и тени, а в нижней части видна шкала значений n , которая может перемещаться вправо – влево относительно неподвижной центральной метки-визира. Шкала так проградуирована, что при точном совмещении наблюдаемой границы света и тени с перекрестием отсчет по этой шкале дает показатель преломления исследуемой жидкости для желтого света с длиной волны $\lambda_D = 5893 \text{ \AA}$. В оптике такую величину обозначают n_D , а мы в данной работе будем обозначать ее n и называть ее будем просто «показатель преломления жидкости».

Б. Измерение средней дисперсии D

Граница света и тени, видимая в поле зрения, окрашена вследствие дисперсии. Для устранения окраски в оптическую часть прибора между измерительной призмой П и окуляром Ок введен компенсатор К (рис. 5). Компенсатор состоит из двух призм прямого зрения, могущих вращаться во взаимно противоположных направлениях с помощью второго маховика, расположенного на корпусе прибора справа от наблюдателя рядом с первым маховиком (для измерения n). Этот второй маховик (для измерения D) расположен выше первого и внешне отличается тем, что по его краю нанесена круговая шкала: половина шкалы – с красными делениями и половина – с черными делениями. При вращении маховика шкала движется относительно неподвижной метки и нониусной шкалы, позволяющей делать отсчеты с точностью до десятой доли деления вращающейся шкалы. За один полный оборот компенсатора в поле зрения окуляра будет дважды наблюдаться полное устранение окраски границы света и тени. Сделав два соответствующих отсчета (один по красной шкале и один по черной), можно при наличии специальных таблиц определить среднюю дисперсию жидкости D .

Порядок выполнения работы

А. Определение показателя преломления жидкости

1. Проследите, чтобы был открыт доступ света к шкале n и внутрь рефрактометрического блока. На левой стенке прибора должна быть отклонена круглая крышка, вмонтированное в нее зеркало будет подсвечивать шкалу показаний n . На рефрактометрическом блоке, который находится в передней части прибора, должна быть открыта миниатюрная заслонка. Через открывшееся окошко свет будет попадать в верхнюю осветительную призму I. Включите настольную лампу и установите ее так, чтобы в окуляр (самая верхняя деталь прибора) был виден освещенный белый (или серый) прямоугольник с перекрестием, а в нижней части поля зрения на зеленом фоне – шкала значений n . Вращая окуляр, добейтесь, чтобы изображение шкалы и визира стало резким.

2. Держась за штифты рефрактометрического блока, отведите вверх и влево его верхнюю часть с осветительной призмой. На открывшуюся полированную грань измерительной призмы нанесите 2-3 капли исследуемой жидкости, после чего закройте рефрактометрический блок, т. е. поставьте осветительную призму на место. Исследуемая жидкость должна при этом заполнять весь зазор между гранями осветительной и измерительной призм.

ВНИМАНИЕ! В качестве первой исследуемой жидкости целесообразно взять чистую воду, и при поиске границы света и тени учитывать, что показатель преломления воды близок к значению 1,33.

3. Вращая основную ручку (нижнюю с правой стороны прибора), добейтесь появления в поле зрения границы светлого и темного полей. Вращая ручку компенсатора (верхнюю с правой стороны прибора), устраните окраску границы света и тени.

4. Совместите границу света и тени с перекрестием в окуляре и запишите соответствующий отсчет по шкале показателей преломления n . Повторите измерения 3 раза. Каждое показание должно быть записано с пятью значащими цифрами.

ВНИМАНИЕ! Прежде чем переходить к следующей жидкости, вспомните, не требуется ли (по указанию преподавателя) измерить для нее сразу и среднюю дисперсию D .

5. Измерьте показатели преломления эталонных растворов. Затем определите показатель преломления раствора неизвестной концентрации. Результаты измерений занесите в табл. 1.

Для перехода к следующей исследуемой жидкости следует отвести осветительную призму в сторону, основательно промыть обе открывшиеся грани (матовую и полированную) чистой водой с помощью мягкой ткани, после чего насухо осторожно протереть их чистой тканью.

Таблица 1

Концентрация раствора К (%)	Показатель преломления			
	n_1	n_2	n_3	$n_{ср}$
1) 0% (чистая вода)				
2) 100% (чистый глицерин)				
3)				
4) и т. д.				

Б. Измерение средней дисперсии

1. Для исследуемой жидкости снять отсчеты Z по круговой шкале маховика компенсатора при тех двух положениях этой ручки, когда граница света и тени будет резкая и серая, т. е. полностью обесцвеченная. Результаты занести в табл. 2. Измерения провести пять раз. Каждый отсчет должен производиться с использованием нониусной шкалы.

Таблица 2

ВНИМАНИЕ! После заполнения табл. 1 и 2 для всех жидкостей, указанных преподавателем, заканчивается составление протокола. Следующие пункты описывают действия студента по составлению отчета, в который к таблицам 1 и 2 следует добавить еще только табл. 5, где отражаются этапы вычисления D по формуле (3).

Дело в том, что разность $n_F - n_C$ можно найти только с помощью градуировочных табл. 3 и 4, которые составлялись заводом-изготовителем и взяты нами из технического паспорта рефрактометра.

2. Из табл. 3 для полученного значения Z найти вспомогательную величину σ . Для дробных значений Z значение σ определяют интерполированием. Результаты измерений занести в табл. 5.

3. Для определенного ранее значения показателя преломления n по табл. 4 определить величины A и B . Результаты измерений занести в табл. 5. Если такого показателя преломления в таблице не окажется, то величины A и B получают линейным интерполированием.

4. Рассчитать величину $n_F - n_C = A + B\sigma$ и занести полученные значения в табл. 5.

5. В соответствии с формулой (3) вычислить среднюю дисперсию D и занести полученное значение в табл. 5.

№ п/п	Отсчет Z	
	по красной шкале	по черной шкале
1		
2		
3		
4		
5		
Среднее		
Общее среднее		

Таблица 3

Z	σ	Z	σ	Z	σ	Z	σ
0	1,000	16	0,669	31	-0,052	46	-0,743
1	0,999	17	0,629	32	-0,104	47	-0,777
2	0,995	18	0,588	33	-0,156	48	-0,809
3	0,988	19	0,545	34	-0,208	49	-0,839
4	0,978	20	0,500	35	-0,259	50	-0,866
5	0,966	21	0,454	36	-0,309	51	-0,891
6	0,951	22	0,407	37	-0,358	52	-0,914
7	0,934	23	0,358	38	-0,407	53	-0,934
8	0,914	24	0,309	39	-0,454	54	-0,951
9	0,891	25	0,259	40	-0,500	55	-0,966
10	0,866	26	0,208	41	-0,545	56	-0,978
11	0,839	27	0,156	42	-0,588	57	-0,988
12	0,809	28	0,104	43	-0,629	58	-0,995
13	0,777	29	0,052	44	-0,669	59	-0,999
14	0,743	30	0,000	45	-0,707	60	-1,000
15	0,707						

Таблица 4

n	A	B
1,300	0,02437	0,03168
1,310	0,02431	0,03155
1,320	0,02425	0,03141
1,330	0,02420	0,03125
1,340	0,02415	0,03108
1,350	0,02410	0,03089
1,360	0,02405	0,03069
1,370	0,02401	0,03047
1,380	0,02396	0,03023
1,390	0,02392	0,02998
1,400	0,02388	0,02971
1,410	0,02384	0,02942
1,420	0,02380	0,02912
1,430	0,02376	0,02880
1,440	0,02373	0,02816
1,450	0,02370	0,02810
1,460	0,02367	0,02773
1,470	0,02364	0,02734
1,480	0,02362	0,02693
1,490	0,02359	0,02650
1,500	0,02357	0,02605

Таблица 5

Исследуемая жидкость	Z	σ	n	A	B	$n_F - n_C$	D
Вода							
Глицерин 100 %							
Раствор X %							

Задание к работе

1. Постройте график зависимости показателя преломления n от концентрации раствора K и определите концентрацию неизвестного раствора.
2. По данным работы определите:
 - а) скорость распространения луча желтого света в растворе с неизвестной концентрацией и погрешность в определении скорости (в вакууме $C = 2,988 \cdot 10^8$ м/с).
 - б) диэлектрическую проницаемость раствора с неизвестной концентрацией, считая магнитную проницаемость $\mu = 1$.
3. Рассчитайте среднюю дисперсию для чистой воды, чистого глицерина и раствора неизвестной концентрации.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы отражения и преломления света.
2. В чем состоит явление полного внутреннего отражения?
3. При вхождении света в более плотную среду сформировался сектор, куда свет не проникает (рис. 2, б). Как угловая ширина темного сектора связана с предельным углом полного внутреннего отражения?
4. Какое явление называется дисперсией света?
5. Какая физическая величина называется средней дисперсией вещества?
6. К какому свету (желтому, зеленому или синему) относятся значения показателя преломления n , указанные на шкале рефрактометра?

Работа 7.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА

Прочтите введение к работе 7.4.

При прохождении луча естественного света последовательно через два поляризатора выполняется закон Малюса: $I_2 = I_1 \cos^2 \varphi$.

Здесь I_1 — интенсивность света, прошедшего через первый поляризатор, I_2 — интенсивность света, прошедшего через второй поляризатор (его называют анализатором), φ — угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора.

Для опытного определения зависимости I от φ надо воспользоваться таким приемником света, который позволил бы измерить величину интенсивности I , если не абсолютную, то хотя бы относительную (например, относительно ее наибольшего значения), т. е. величину $\frac{I}{I_{\max}}$.

В настоящей работе приемником света служит фотоэлемент. При облучении фотоактивной поверхности элемента светом в цепи фотоэлемента возникает фототок.

В первой части работы определяется зависимость силы фототока от интенсивности освещения. Требуется экспериментально доказать, что эта зависимость является линейной.

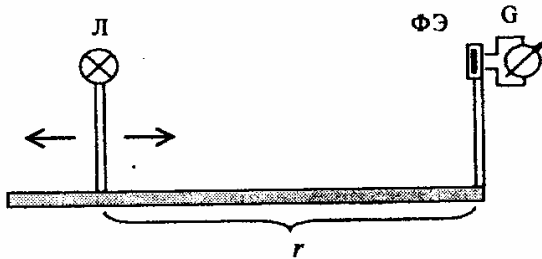


Рис. 1

Для изменения интенсивности света, падающего на фотоэлемент, в настоящей работе предусмотрена возможность устанавливать маленькую лампочку на разных расстояниях от фотоэлемента. Как известно, интенсивность света от точечного источника обратно пропорциональ-

на квадрату расстояния от источника до освещаемого места. Схема установки показана на рис. 1. На оптической скамье помещена лампа накаливания Л и фотоэлемент ФЭ, который присоединен к гальванометру Г.

Опыт состоит в том, что измеряют ток i в цепи фотоэлемента при различных расстояниях r от лампы до фотоэлемента. Если при этом окажется, что фототок обратно пропорционален величине r^2 , то это и будет подтверждением линейной зависимости фототока i от интенсивности света I .

В этом случае

$$\frac{i}{i_{\min}} = \frac{r_{\max}^2}{r^2},$$

где i_{\min} – фототок при наибольшем расстоянии r_{\max} от источника до фотозлемента. Тогда зависимость $i(r)$ должна иметь вид

$$i_{\text{теор}} = \frac{i_{\min} \cdot r_{\max}^2}{r^2}. \quad (1)$$

Итогом первой части работы должно стать подтверждение того, что фототок пропорционален интенсивности, и тем самым является справедливым соотношение

$$\frac{i}{i_{\max}} = \frac{I}{I_{\max}}.$$

Во второй части работы определяется зависимость интенсивности света, прошедшего через два поляризатора, от угла φ между главными плоскостями этих поляризаторов. Цель этого опыта – проверка закона Малюса.

Для этого пользуются установкой, изображенной на рис. 2. На оптической скамье установлена лампа Л, первый поляризатор П, второй поляризатор А (анализатор) и фотозлемент ФЭ. К фотозлементу подключен гальванометр Г. На анализаторе А есть круг с угловыми делениями. Можно найти такое

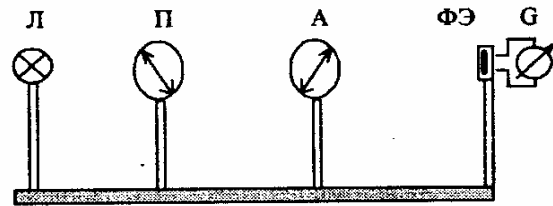


Рис. 2

положение поляризатора, при котором по круговой шкале анализатора непосредственно измеряется угол φ между главными плоскостями поляризатора и анализатора. Это делается следующим образом. Поворачивая анализатор А, устанавливают его в положение, соответствующее показанию 0. Зажигают лампу Л, при этом гальванометр G_2 покажет, что в цепи фотозлемента появился ток. Поворачивают поляризатор П до тех пор, пока показание гальванометра Г не станет максимальным. Это означает, что угол между главными плоскостями П и А равен нулю. Если больше не трогать поляризатор П, а поворачивать только анализатор А, то будет изменяться угол φ между главными плоскостями П и А, причем значение этого угла будет соответствовать показанию по круговой шкале анализатора А.

Прямые измерения во второй части работы сводятся к тому, чтобы поворотом анализатора изменять угол φ в пределах от 0 до 180° (через 10°) и для каждого значения φ записывать в таблицу показание гальванометра.

По результатам этого эксперимента строится зависимость $\left(\frac{I}{I_{\max}}\right)_{\text{эксп}}$ от φ . А по закону Малюса $\left(\frac{I}{I_{\max}}\right)_{\text{теор}} = \cos^2 \varphi$. Эту зависи-

мость $\left(\frac{I}{I_{\max}}\right)_{\text{теор}}$ от φ следует построить на одном листе с экспериментальным графиком. В сопоставлении этих двух графиков и заключается проверка закона Малюса.

Порядок выполнения работы

1. Установите на оптической скамье только лампу Л и фотоэлемент ФЭ в соответствии с рис. 1.
2. Подключите гальванометр G к фотоэлементу и установите световой зайчик гальванометра на нулевое деление.
3. Включите лампу Л.
4. Измерьте фототок при 7–10 разных расстояниях от лампы до фотоэлемента. Не следует придвигать фотоэлемент ближе, чем на 20 см к лампе. (При меньших расстояниях лампу нельзя считать точечным источником.) Результаты измерений запишите в табл. 1.
5. Установите на оптической скамье поляризатор П и анализатор А в соответствии с рис. 2.
6. Поворачивая анализатор вокруг оптической оси, установите круг анализатора А в положение 0° .
7. Поворачивая поляризатор П, добейтесь максимального отклонения зайчика гальванометра. Поляризатор П больше не трогайте.
8. Поворачивая анализатор А, изменяйте угол φ в пределах от 0° до 180° (через 10°). При каждом угле φ измерьте ток в цепи фотоэлемента. Результаты измерений запишите в табл. 2.

Задание к работе

1. По данным табл. 1 постройте график $i_{\text{эксп}} = f(r)$.
2. По формуле (1) рассчитайте фототоки $i_{\text{теор}}$ при различных расстояниях r . По данным расчета постройте график $i_{\text{теор}} = f(r)$. Сравните кривые зависимостей $i_{\text{эксп}} = f(r)$ и $i_{\text{теор}} = f(r)$, построив их на одном графике. Ответьте на вопрос: подтвердилось ли предположение о том, что сила тока протекающего через фотоэлемент, пропорциональна интенсивности падающего на него света?

3. Для всех значений φ , указанных в табл. 2, рассчитайте величины

$$\left(\frac{I}{I_{\max}}\right)_{\text{теор}} = \cos^2 \varphi, \quad \left(\frac{I}{I_{\max}}\right)_{\text{эксп}} = \frac{i}{i_{\max}}$$

Результаты запишите в табл. 2.

4. Постройте на одном графике две кривые полученных зависимостей $\left(\frac{I}{I_{\max}}\right)_{\text{эксп}} = f(\varphi)$ и для сравнения $\left(\frac{I}{I_{\max}}\right)_{\text{теор}} = f(\varphi)$.

5. Сделайте вывод о том, соответствует ли полученная экспериментальная кривая закону Малюса.

Контрольные вопросы

1. Как зависит интенсивность света от расстояния до точечного источника?
2. Чем отличается луч плоскополяризованного света от луча естественного света?
3. Что такое главная плоскость поляризатора?
4. Сформулируйте закон Малюса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1971 и более поздние издания.
2. Методические указания к проведению и обработке результатов физического эксперимента / Р. М. Пилосян; ЛЭИС. Л., 1988.
3. Ландсберг Г. С. Оптика. М.: Наука, 1976.
4. Сивухин Д. В. Оптика. М.: Наука, 1985.