

Министерство образования и науки
Российской Федерации
КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Л.Ф. ДОБРО, Н.М. БОГАТОВ, О.Е. МИТИНА

ОПТИКА
Лабораторный практикум
Часть 1

Краснодар
2012

УДК 577 (075.8)
ББК 28.071 .Я 73
Д 56

Рецензенты:

Доктор педагогических наук, канд. физ.-мат. наук, профессор,
зав. кафедры физики ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный
технологический университет»

Шапошникова Т.Л.

Добро Л. Ф., Богатов Н. М., Митина О.Е.

Д56 Лабораторный практикум по оптике. Ч. 1/ Л. Ф. Добро,
Н. М. Богатов. Краснодар: Кубан. гос. ун-т, 2012. 96 с.

Дается описание 8 лабораторных работ по курсу «Оптика». Приведены теоретические сведения, методические указания по выполнению работ, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Адресуется студентам физико-технического факультета КубГУ.

УДК 577 (075.8)
ББК 28.071 .Я 73

©Кубанский государственный
университет, 2012
©Добро Л. Ф., Богатов Н. М.,
Митина О.Е., 2012

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум по курсу «Оптика» представляет собой математическое обобщение наблюдений, практического опыта и эксперимента. Он органически связан со многими областями современного естествознания и служит научной основой решения многих прикладных технических задач.

Формирование навыков выполнения физического эксперимента – необходимый элемент физико-технического образования. Анализ экспериментальных данных позволяет убедиться в соответствии выводов теории результатам опытов.

В ходе исследования устанавливаются количественные зависимости между различными явлениями, которые определяются в результате измерений. Вследствие различных причин никакое измерение не может быть выполнено абсолютно точно, поэтому следует не только определять саму величину, но и оценивать погрешность измерений.

Описания лабораторных работ настоящего практикума построены по общей схеме и включают необходимые сведения о цели работы, используемом оборудовании, порядке выполнения и форме представления результатов измерений. При подготовке к лабораторным работам необходимо также пользоваться конспектами лекций, учебной и специальной литературой. Так, прямые ответы на некоторые контрольные вопросы по теме изучаемых физических явлений не содержатся в тексте работ.

После выполнения лабораторной работы студент обязан представить *на следующем лабораторном занятии* оформленный отчет и сдать работу. При сдаче лабораторной работы необходимо владеть теоретическим материалом, знать ответы на контрольные вопросы, уметь комментировать полученные результаты и погрешности измерений, быть готовым продемонстрировать на лабораторной установке любые этапы эксперимента. Требования по оформлению работ в целом стандартны. Все экспериментальные результаты, должны сопровождаться оценкой погрешности измерений независимо от того, есть ли об этом специальные указания в работе или нет.

Лабораторная работа 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ И ЖИДКИХ ОПТИЧЕСКИХ СРЕД

Задание 1.1. Определение показателя преломления стекла с помощью микроскопа

Приборы и принадлежности: микроскоп с микрометрическим перемещением тубуса; микрометр; стеклянная пластинка с меткой на одной поверхности; пластинка из исследуемого стекла с метками на обеих поверхностях; чистая пластинка из исследуемого стекла.

Цель задания: изучить методику измерений показателя преломления с помощью микроскопа, имеющего микрометрическое перемещение тубуса, и экспериментально определить показатель преломления стекла двумя способами.

Краткая теория

При наблюдении предмета сквозь слой воды или стеклянную пластинку предмет всегда кажется расположенным ближе к наблюдателю, чем в действительности. Это кажущееся приближение связано с преломлением света на границе пластинки с воздухом и зависит как от толщины пластинки, так и от её показателя преломления. Измеряя толщину пластинки с помощью микрометра, а кажущееся смещение предмета при наблюдении сквозь пластинку с помощью микроскопа, тубус которого снабжен микрометрическим винтом, можно определить показатель преломления стеклянной пластинки.

Установим связь между показателем преломления стекла n , толщиной пластинки d и величиной a кажущегося поднятия точки S предмета, находящейся в соприкосновении с нижней поверхностью пластинки. При этом будем предполагать, что глаз находится на нормали к плоскости пластинки, проходящей через точку S (рис. 1.1).

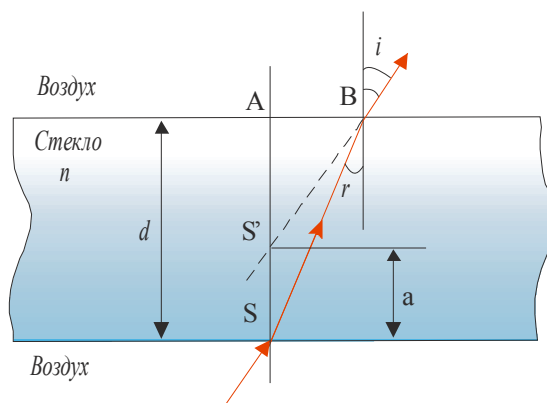


Рис. 1.1. Прохождение света сквозь стеклянную пластинку

Рассмотрим ход луча SB , направленного под малым углом r к нормали. Преломившись в точке B , он выходит в воздух под углом, определяемым уравнением

$$\sin i = n \sin r. \quad (1.1)$$

Наблюдателю кажется, что рассматриваемый луч и другие близкие к нормали лучи исходят из точки S' . Интересующая нас величина кажущегося поднятия a равна разности $AS - AS' = a$.

Из треугольников ABS и ABS' следует, что

$$AB = AS \operatorname{tg} r = d \operatorname{tg} r, \quad AB = AS' \operatorname{tg} i = (d - a) \operatorname{tg} i.$$

$$\text{Отсюда имеем } d \cdot \operatorname{tg} r = (d - a) \operatorname{tg} i, \quad \frac{d}{(d - a)} = \frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{tg} r}.$$

При малости углов r и i отношение их тангенсов может быть

$$\text{заменено отношением синусов } \frac{d}{(d - a)} = \frac{\sin i}{\sin r}.$$

$$\text{Воспользовавшись (1.1), получаем } \frac{d}{(d - a)} = \frac{\sin i}{\sin r} = n, \quad \frac{d}{(d - a)} = n.$$

Таким образом, зная толщину пластины и величину кажущегося поднятия, можно определить показатель преломления. Кажущееся поднятие определяется при помощи микроскопа, имеющего винт для точного перемещения тубуса. Здесь возможны два отличных друг от друга способа, причем максимальная точность результатов достигается, когда наблюдаемая в микроскоп метка находится в центральной части поля зрения.

Способ 1. Пусть микроскоп сфокусирован на какой-либо штрих, нанесённый на предметное стекло. Если на предметное стекло положить исследуемую стеклянную пластину толщиной d , то для фокусировки микроскопа на тот же штрих его тубус нужно

переместить вверх на некоторое расстояние a (рис. 1.2). Следовательно, показатель преломления n рассчитывается по формуле (1.2)

$$n = \frac{d}{(d - a)} \quad (1.2)$$

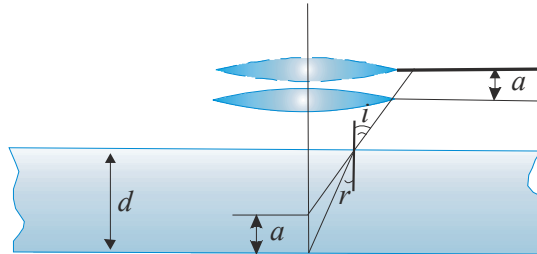


Рис. 1.2. Смещение тубуса микроскопа при наблюдении предмета через пластинку и без неё

Способ 2. Пусть на столике микроскопа лежит исследуемая плоскопараллельная стеклянная пластинка толщиной d и микроскоп сфокусирован на метку, находящуюся на её верхней стороне.

Для того чтобы увидеть в микроскоп метку, находящуюся на нижней стороне пластинки, его тубус необходимо переместить вниз на некоторое расстояние h (рис. 1.3).

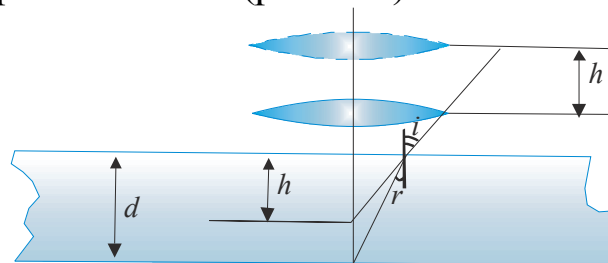


Рис. 1.3. Смещение микроскопа при перефокусировке с верхней стороны прозрачной пластинки на нижнюю

Показатель преломления следует определять по формуле (1.3):

$$n = \frac{d}{h} \quad (1.3)$$

Порядок выполнения задания 1.1

Способ 1. Микроскоп устанавливают так, чтобы лучи света падали на зеркало и отражались в объективе микроскопа. При этом

в окуляр микроскопа будет видно светлое поле. На предметный столик кладут рассматриваемый объект (стеклянная пластинка с меткой) и укрепляют его лапками. Сначала грубо, при помощи кремальеры, а затем точно, при помощи микрометрического винта, устанавливают максимально резкое изображение объекта и замечают показания микрометрического винта. Затем накрывают объект исследуемой стеклянной пластиной и вращением микрометрического винта восстанавливают резкость изображения. При этом отсчитывают целое число оборотов микрометрического винта и число делений.

Разность отсчетов микрометрического винта микроскопа равна кажущемуся поднятию объекта. Один оборот винта передвигает тубус микроскопа на 0,1 мм. Одно деление микровинта соответствует 0,002 мм передвижения тубуса. Эти измерения повторяют несколько раз и находят среднее значение. Показатель преломления определяют по формуле (1.2).

Толщину исследуемой пластинки измеряют микрометром. Это измерение проводят тоже несколько раз в том месте пластинки, которое было под объективом микроскопа, и находят среднее значение. Результаты измерений заносят в табл. 1.1.

Таблица 1.1

№ п/п	d , мм	$d_{\text{ср}}$, мм	a , мм	$a_{\text{ср}}$, мм	$n_{\text{ср}}$	Δn	$\Delta n/n$
1-й способ							
1							
...							
5							
2-й способ							
1							
...							
5							

Способ 2. На предметный столик кладут пластинку, на поверхности которой нанесены одна над другой метки, верхняя из них должна быть полупрозрачной. Переходя от наблюдения верхней метки к наблюдению нижней, мы как бы опускаем наблюдаемый объект на толщину пластинки d , однако нижняя метка кажется отстоящей по нормали от верхней не на толщину d , а лишь на расстояние $(d - a)$, на которое нужно опустить тубус. Расстояние $(d - a)$ обозначено через h (рис. 1.3). Формула для вычисления показателя преломления (см. формулу 1.3).

Относительная ошибка находится по формулам:

$$\text{в 1-м способе } \frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{(d_{\text{ср}} - a_{\text{ср}})} \sqrt{\Delta a^2 + \left(\frac{a_{\text{ср}}}{d_{\text{ср}}}\right)^2 \Delta d^2},$$

$$\text{во 2-м способе } \frac{\Delta n}{n} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h_{\text{ср}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d_{\text{ср}}}{d_{\text{ср}}}\right)^2}$$

Контрольные вопросы к заданию 1.1

1. Что называется показателем преломления?
2. Каков физический смысл абсолютного и относительного показателей преломления?
3. В чем заключается закон преломления света?
4. От чего зависит величина кажущегося поднятия предмета, рассматриваемого через стекло?
5. Почему максимальная точность результата работы получается тогда, когда объект находится в центральной части поля зрения?
6. Чему равно увеличение микроскопа? Как вычислить увеличение микроскопа в соответствии с данными, указанными на объективе и окуляре?
7. Чем ограничивается толщина пластинки, которую можно применить в данной работе?

Задание 1.2. Определение показателя преломления и концентрации раствора сахара рефрактометром

Приборы и принадлежности: рефрактометр Аббе (РПЛ-2); набор исследуемых сахарных растворов различной концентрации.

Цель задания: ознакомиться с принципом действия рефрактометра, определить показатель преломления сахарных растворов.

Краткая теория

Устройство рефрактометра Аббе основано на использовании явления полного внутреннего отражения.

Пусть луч света падает на границу раздела двух сред со стороны оптически более плотной среды n_2 (рис. 1.4). Для углов падения r , меньших некоторого r' (луч I), часть светового потока, преломляясь, проникает в менее плотную среду n_1 (луч I''), а часть

отражается от границы раздела (луч $1'$). При углах падения $r' \leq r'' \leq 90^\circ$ преломления света не происходит и наступает полное внутреннее отражение (луч $2'$). Предельный угол полного внутреннего отражения r' соответствует углу преломления $r'' = 90^\circ$ и, следовательно,

$$\sin r' = \frac{n_1}{n_2}$$

Зная показатель преломления одной из сред и определяя на опыте предельный угол, можно вычислить показатель преломления второй среды.

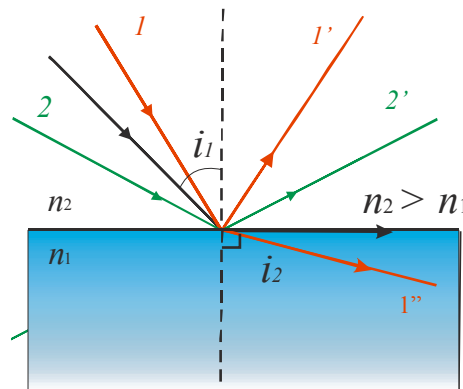


Рис. 1.4. Полное внутреннее отражение при переходе луча из более плотной в менее плотную оптическую среду, $n_2 > n_1$

При измерениях показателя преломления с помощью рефрактометра Аббе можно пользоваться как методом полного внутреннего отражения, так и методом скользящего луча. Оптическая схема рефрактометра показана на рис. 1.5.

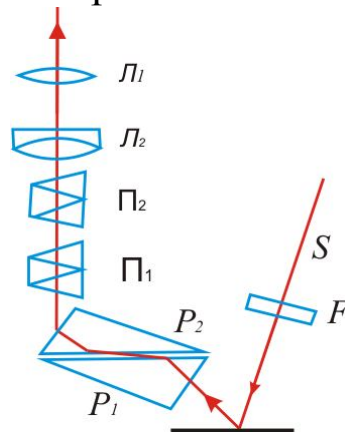


Рис. 1.5. Оптическая схема рефрактометра Аббе

Основная его часть содержит две стеклянные прямоугольные призмы P_1 и P_2 , изготовленные из стекла с большим показателем преломления. В разрезе призмы имеют вид прямоугольных

треугольников, обращенных друг к другу гипотенузами; зазор между призмами имеет ширину около 0,1 мм и служит для помещения исследуемой жидкости.

При освещении призм P_1 и P_2 белым светом граница раздела будет размыта и окрашена в различные цвета. Чтобы получить резкое изображение, перед объективом L_2 зрительной трубы помещают две призмы прямого зрения Π_1 и Π_2 (призмы Амичи). Каждая призма состоит из трех склеенных призм с различными показателями преломления и различной дисперсией (например, крайние призмы изготовлены из кронгласа, а средняя – из флингласа). Призмы рассчитаны так, чтобы монохроматический луч с длиной волны 5893 Å не испытывал отклонения. Такое устройство называется компенсатором. L_1 – окуляр с отсчётной шкалой, расположенной в фокальной плоскости объектива L_2 .

Ход лучей при работе по методу скользящего луча изображен на рис. 1.6. Свет проникает в призму P_1 через грань EF и попадает в жидкость через матовую грань ED . Свет, рассеянный матовой поверхностью, проходит слой жидкости и под всевозможными углами ($0^\circ \leq i_1 \leq 90^\circ$) падает на сторону AC призмы P_2 . Скользящему лучу в жидкости ($i_1 = 90^\circ$) соответствует предельный угол преломления r_1 . Преломленные лучи с углами больше r_1 не возникают. В связи с этим угол i_2 выхода лучей из грани AB может изменяться лишь в интервале от некоторого значения i_2 до 90° .

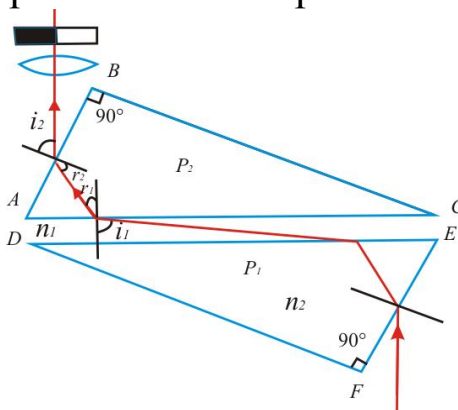


Рис. 1.6. Ход луча в призмах при использовании метода скользящего луча

Если свет, выходящий из грани AB , пропустить через собирающую линзу L_1 , то в её фокальной плоскости наблюдается резкая граница светлого и темного полей. Граница рассматривается с помощью линзы L_2 . Линзы L_1 и L_2 образуют зрительную трубу, установленную на бесконечность. В их общей фокальной

плоскости расположен крест, образованный тонкими нитями. Положение границы в фокальной плоскости линз зависит от величины показателя преломления жидкости n . Вращая трубу относительно призм, можно совместить границу раздела света и тени с центром креста. В этом случае измерение показателя преломления сводится к измерению угла i_2 , образованного нормалью к грани AB и оптической осью зрительной трубы.

При измерении показателя преломления жидкости методом полного внутреннего отражения призму P_2 освещают со стороны грани BC (рис. 1.7) через специальное отверстие в кожухе прибора.

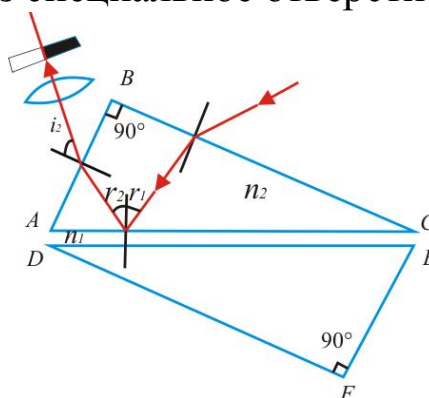


Рис. 1.7. Ход лучей при использовании метода полного внутреннего отражения

Грань BC делается матовой. Свет в этом случае падает на границу раздела AC под всевозможными углами. При $r_1 > r'_1$ наступает полное внутреннее отражение, при $r_1 < r'_1$ свет отражается лишь частично. В поле зрения трубы наблюдается при этом резкая граница света и полутени.

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

Порядок выполнения задания 1.2

1. Установить рефрактометр так, чтобы свет от окна (неяркий) освещал верхнее окно прибора, через это отверстие свет попадает на осветительную призму.

2. Осторожно открыть верхнюю часть рефрактометра и на гладкую поверхность нижней призмы аккуратно, чтобы не

поцарапать поверхность призмы, при помощи пипетки поместить несколько капель исследуемой жидкости.

3. Закрывать прибор и, смотря в окуляр, добиться хорошего освещения поля зрения, поворачивая рефрактометр против света.

4. Если в поле зрения окуляра нечетко видны деления, осторожно поворачивая окуляр, установить четкую видимость шкалы по своему глазу.

5. Если граница светотени имеет радужную окраску, то, вращая рукоятку компенсатора, добиться исчезновения радужной окраски.

6. Для определения показателя преломления (левая шкала) или процентного содержания сахара в растворе (правая шкала) вращением правой рукоятки добиться совпадения трёх чёрточек с границей светотени.

7. Измерения проделать не менее трёх раз.

8. После измерений осторожно, чтобы не поцарапать поверхность призмы, очистить поверхность ватой, смоченной дистиллированной водой.

9. Результаты измерений для всех растворов занести в табл. 1.2.

10. Построить график зависимости показателя преломления n от концентрации раствора.

Таблица 1.2

№ п/п	Показатель преломления, n	Содержание сахара, %
1-й раствор		
1		
2		

Контрольные вопросы к заданию 1.2

1. Что называется абсолютным и относительным показателем преломления?

2. Что такое полное внутреннее отражение?

3. Что называется предельным углом полного внутреннего отражения?

4. Как зависит показатель преломления раствора от концентрации?

5. Что представляет собой оптическая схема рефрактометра?

Рекомендуемая литература: [2], [5], [6], [7], [10], [12]

Лабораторная работа 2

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ФОТОЭФФЕКТА

Задание 2.1. Проверка закона обратных квадратов

Приборы и принадлежности: фотоэлемент (селеновый); микроамперметр или универсальный цифровой вольтметр; осветитель; линейка.

Цель задания: экспериментальная проверка закона обратных квадратов.

Краткая теория

Фотоэффект устанавливает непосредственную связь между электрическими и оптическими явлениями. Под действием света с поверхностей металлов и некоторых полупроводниковых материалов могут вырываться электроны. Это явление называется внешним фотоэффектом (или внешней фотоэмиссией).

В полупроводниках также наблюдаются внутренний и вентильный фотоэффекты. Внутренний фотоэффект (или фотопроводимость) – явление возникновения внутри полупроводника избыточных носителей тока (электронно-дырочных пар) при поглощении оптического излучения, в результате чего увеличивается проводимость полупроводника.

Вентильный фотоэффект наблюдается при освещении контактной области двух полупроводников n- и p-типов проводимости (p-n-переход) и состоит в возникновении фотоэлектродвижущей силы в отсутствие внешнего поля. Объясняется это следующим образом. При контакте полупроводников n- и p-типов возникает, как известно, контактная разность потенциалов (запирающий слой), таким образом, в области p-n-перехода имеется встроенное внутри поле. При освещении p-n-перехода в p- и n-областях вследствие внутреннего фотоэффекта образуются электронно-дырочные пары, которые, попав в область действия p-n-перехода, будут им разделены так, что электроны перейдут в n-область, а дырки – в p-область.

Избыток концентрации электронов в n-области и дырок в p-области и означает возникновение э.д.с. Если на n- и p-области нанести металлические контакты и подсоединить внешнюю нагрузку, то при освещении p-n-перехода через нее потечет электрический ток. Аналогичные явления возникают и при контакте металла с полупроводником. На описанном принципе работают фотоэлектрические преобразователи, часто называемые солнечными элементами.

Вентильный фотоэффект иначе называют фотоэффектом в запирающем слое.

Приборы, устройство которых основано на явлениях фотоэффекта, называются фотоэлементами. Они очень разнообразны по своей конструкции и типу и находят широкое применение в технике. Различают фотоэлементы с внешним фотоэффектом, так называемые вакуумные или газонаполненные, фотоэлементы, основанные на внутреннем фотоэффекте, – фоторезисторы и на фотоэффекте в запирающем слое – фотодиоды. В задании 1 используют селеновый фотоэлемент с запирающим слоем, в задании 2 – электровакуумный фотоэлемент.

Селеновый фотоэлемент (рис. 2.1) представляет собой p-n-переход из селена p-типа А, селенида кадмия n-типа С, нанесенный на стальную подложку М. Фоточувствительный слой защищен от внешних воздействий пленкой прозрачного лака. Если n-слой соединить через гальванометр со стальной подложкой, контактирующей с p-областью, и осветить p-n-переход, то под действием падающего излучения и внутреннего поля p-n-перехода в n-области появятся избыточные электроны, а в p-области – дырки. В результате гальванометр покажет наличие тока I в цепи. Этот ток называется фототоком. В таком фотоэлементе лучистая энергия падающего света непосредственно будет переходить в энергию электрического тока.

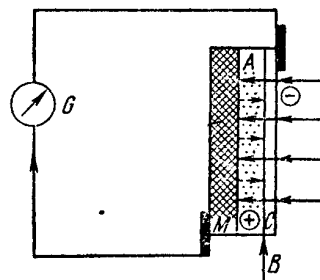


Рис. 2.1. Устройство селенового фотоэлемента: A – Se p-типа; C – $CdSe$ n-типа; B – область p-n-типа; M – стальная подложка; G – гальванометр

Освещённостью (при использовании фотометрических величин) называют отношение светового потока к площади освещаемой поверхности. Для количественных определений принят эталон единицы силы света – кандела. За единицу светового потока принимается световой поток, испускаемый внутри единичного телесного угла точечным источником света в одну канделу. Эта единица носит название «люмен». За единицу освещенности принимается освещённость, создаваемая на поверхности сферы радиусом в 1 м помещенным в её центре изотропным источником света, силой света в одну канделу. Эта единица носит название «люкс»: $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм} / \text{м}^2$. Диапазон спектральной чувствительности фотоэлемента – 0,4–0,7 мкм, максимум спектральной характеристики – 0,5–0,6 мкм.

Для точечного источника света освещённость поверхности, т.е. световой поток, падающий на единицу площади, изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния между источником света и освещённой поверхностью.

Представим себе две концентрические сферы радиусом r' и r'' , в центре которых помещён точечный источник P (рис. 2.2).

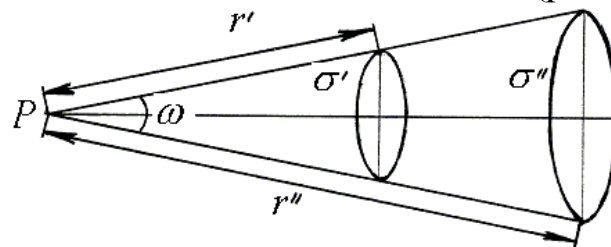


Рис. 2.2. Иллюстрация к выводу закона обратных квадратов

Рассмотрим световой поток, излучаемый точечным источником света P в пределах телесного угла ω . Обозначим этот поток $\Phi(\omega)$. Освещённость площадки σ' , расположенной на первой сфере:

$$E' = \frac{\Phi'(\omega)}{r'^2(\omega)}$$

Освещённость площадки σ'' , расположенной на второй сфере:

$$E'' = \frac{\Phi''(\omega)}{r''^2(\omega)}$$

Разделив одно равенство на другое, получим выражение известного закона обратных квадратов:

$$\frac{E'}{E''} = \frac{r'^2}{r''^2}. \quad (2.1)$$

Для вывода этого закона сделано три допущения:

1. источник света принят за светящуюся точку;
2. свет не испытывает поглощения в среде, в которой он распространяется;
3. световой поток внутри данного телесного угла однороден.

Эти допущения возможны, поскольку размеры источника света берутся достаточно малыми; свет распространяется в воздухе, где поглощением света при небольших расстояниях можно пренебречь; световой поток для электрических лампочек в пределах направлений, перпендикулярных нитям, на небольших расстояниях можно считать однородным.

На практике приходится измерять не освещенность, а силу фототока при данном освещении фотоэлемента.

Если I' и I'' – силы фототока при освещении поверхностей σ' и σ'' , то, учитывая линейную зависимость фототока от освещенности фотоэлемента, можно записать

$$\frac{E'}{E''} = \frac{I'}{I''}. \quad (2.2)$$

Сравнивая равенства (2.1) и (2.2), имеем

$$\frac{I'}{I''} = \frac{r''^2}{r'^2}. \quad (2.3)$$

Следовательно, работа сводится к измерению силы фототока I на различных расстояниях r фотоэлемента от источника света.

Порядок выполнения задания 2.1

На рейтерах оптической скамьи укреплен лампа накаливания и фотоэлемент с запирающим слоем. В качестве осветителя используется лампа накаливания. Фотоэлемент подключается к чувствительному стрелочному микроамперметру. Фотоэлемент должен быть укреплен перпендикулярно к направлению падающих лучей, а его фотоприемная площадка полностью освещена.

1. Установить фотоэлемент на расстоянии 10 см от лампы. Включить лампу сетевым тумблером, записать показания микроамперметра.

2. Последовательно изменить расстояние от фотоэлемента до лампы, передвигая его на 10 см, всякий раз записывая расстояние и показания микроамперметра. Записи ведут при увеличении расстояния и соответствующем уменьшении его, находят среднее значение показаний микроамперметра для каждого расстояния (измерения проводятся не менее трёх раз).

3. Проверить выполнение закона обратных квадратов, построив для этого по экспериментальным данным зависимость $I = f(r)$ и наложив на нее теоретическую кривую

$$I = f(r) = \frac{const}{r^2}$$

Очевидно, что $const = r_i^2 I_i$, где r_i и I_i – любая пара экспериментальных значений (так как источник света можно считать точечным только с некоторым приближением, экспериментальные значения лучше взять в достаточно удаленной точке).

Замечание. При проведении измерений следует исключить попадание постороннего света на фотоэлемент.

4. Полученные экспериментальные и расчетные значения занести в табл. 2.1, построить на одном графике экспериментальную и теоретическую зависимости $I = f(r)$.

Таблица 2.1

№ п/п	Расстояние от фотоэлемента до осветителя l , см	Фототок I_b (при увеличении расстояния), мкА	Фототок I_b (при уменьшении расстояния), мкА	Среднее значение (измеренное) фототока I_{cp} , мкА	Расчетное значение фототока I , мкА
1	10				
2	20				
...	...				
5	50				

Контрольные вопросы к заданию 2.1

1. В чём заключается явление внутреннего фотоэффекта? В каких фотоприемниках оно используется?
2. В чем заключается явление внешнего фотоэффекта?
3. Что такое фотоэлементы и каков принцип действия фотоэлемента, используемого в данном задании?
4. Какие фотометрические величины Вам известны?

5. В чем суть закона обратных квадратов?

Задание 2.2 Изучение внешнего фотоэффекта, снятие вольт-амперной характеристики электровакуумного фотоэлемента

Приборы и принадлежности: электровакуумный фотоэлемент; регулируемый источник питания с изменяемой полярностью; микроамперметр; вольтметр; масштабная линейка; осветитель; оптическая скамья.

Цель задания: снятие вольтамперной характеристики газонаполненного фотоэлемента, проверка законов фотоэффекта.

Краткая теория

Внешним фотоэффектом (фотоэлектронной эмиссией) называется испускание электронов веществом под действием света. Электроны, вылетающие из вещества при внешнем фотоэффекте, называются фотоэлектронами, а электрический ток, образуемый ими при упорядоченном движении во внешнем электрическом поле, – фототоком.

На рис. 2.3 показана схема установки для изучения внешнего фотоэффекта в металлах.

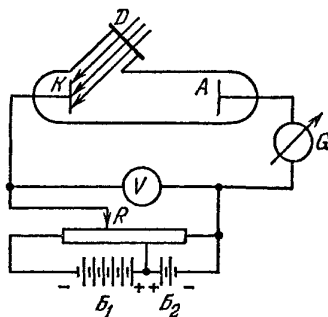


Рис. 2.3. Схема установки для изучения внешнего фотоэффекта

Свет падает через окно D , прозрачное во всей исследуемой спектральной области, на поверхность катода фотокатода K , помещенного внутри трубки, в которой создан вакуум. Характер зависимости фототока I в трубке от разности потенциалов U между анодом A и катодом K при постоянной энергетической освещенности E , катода монохроматическим светом изображен на рис. 2.4.

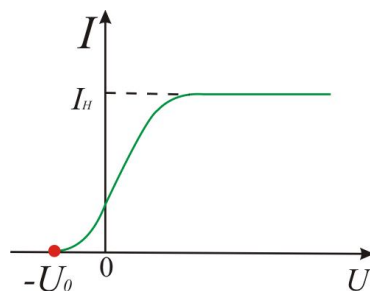


Рис. 2.4. Зависимость фототока I от разности потенциалов U между анодом и катодом: $E_{\text{э}} = \text{const}$

Существование фототока при отрицательных значениях U от 0 до $-U_0$ свидетельствует о том, что фотоэлектроны выходят из катода, имея некоторую начальную скорость и соответственно кинетическую энергию. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов mv_{max}^2 связана с задерживающим напряжением (задерживающим потенциалом) U_0 соотношением

$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = eU_0, \quad (2.4)$$

где e и m – абсолютные величины заряда и масса электрона.

Фототок увеличивается с ростом U лишь до определенного предельного значения I_n , называемого фототоком насыщения. При фототоке насыщения все электроны, вылетающие из катода под влиянием света, достигают анода. Если n_c – число фотоэлектронов, покидающих катод за 1 с, то $I_n = en_c$.

Основные законы внешнего фотоэффекта

1. При неизменном спектральном составе света, падающего на фотокатод, фототок насыщения пропорционален энергетической освещенности катода (закон Столетова):

$$I_n \sim E_{\text{э}} \text{ и } n_c \sim E_{\text{э}}.$$

2. Для данного фотокатода максимальная начальная скорость фотоэлектронов зависит от частоты света и не зависит от его интенсивности.

3. Для каждого фотокатода существует красная граница внешнего фотоэффекта, т.е. минимальная частота света ν_0 , при которой еще возможен внешний фотоэффект; частота ν_0 зависит от материала фотокатода и состояния его поверхности.

Второй и третий закон внешнего фотоэффекта не удается объяснить на основе классической электромагнитной теории света. Согласно этой теории вырывание электронов проводимости из металла – результат их «раскачивания» в электромагнитном поле световой волны, которое должно усиливаться при увеличении интенсивности света и пропорциональной ей энергетической освещенности фотокатода.

Лишь квантовая теория света позволила успешно объяснить законы внешнего фотоэффекта. Развивая идеи М. Планка о квантовании энергии атомов – осцилляторов, А. Эйнштейн высказал гипотезу о том, что свет не только излучается, но также распространяется в пространстве и поглощается веществом в виде отдельных дискретных квантов электромагнитного излучения – фотонов. Все фотоны монохроматического света частоты ν имеют одинаковую энергию $E = h\nu$, где h – постоянная Планка, и движутся в пространстве со скоростью c света в вакууме. В случае поглощения света веществом каждый поглощенный фотон передает всю свою энергию частице вещества. Например, при внешнем фотоэффекте электрон проводимости металла, поглощая фотон, получает его энергию $h\nu$. Для выхода из металла электрон должен совершить работу выхода A . Поэтому уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта, выражающее закон сохранения энергии при фотоэффекте, имеет вид

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (2.5)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $m = m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона.

Порядок выполнения задания 2.2

1. Установить на оптической скамье электровакуумный фотоэлемент на одной высоте с осветителем, подать прямое напряжение на фотоэлемент.
2. Включить источник питания и осветитель.
3. Изменять подаваемое на фотоэлемент прямое напряжение от 0 В до достижения тока насыщения, записывать показания вольтметра и амперметра. Затем уменьшать напряжение до 0 В и измерять фототок при тех же значениях напряжения.

4. Выполнить п. 3 для трех различных расстояний от фотоэлемента до осветителя.
5. Полученные результаты представить в виде табл. 2.2.
6. Построить на одном графике три вольтамперные характеристики.

Таблица 2.2

Расстоянии от фотоэлемента до осветителя $l, \text{ см}$	Подаваемое на фотоэлемент прямое напряжение $U, \text{ В}$	Фототок I при повышении напряжения, мкА	Фототок I при понижении напряжения, мкА	Среднее значение фототока $I_{\text{ср}}$, мкА
l_n				
l_n				

Контрольные вопросы к заданию 2.2

1. В чем заключается явление внешнего фотоэффекта?
2. Какова суть законов фотоэффекта?
3. Как формулируется уравнение Эйнштейна для фотоэффекта?
4. Что называется работой выхода электрона из металла?
5. Из каких участков состоит вольтамперная характеристика вакуумного фотоэлемента?

Задание 2.3. Определение красной границы фотоэффекта

Краткая теория

Закон Эйнштейна (2.5) непосредственно приводит к представлению о красной границе (пороге) фотоэффекта.

Для каждого металла должна существовать некоторая минимальная частота света ν_0 , при которой ещё возможен вылет электронов. Эта минимальная частота ν_0 определяется из равенства

$$h\nu_0 = A \text{ и } \nu_0 = 0. \quad (2.6)$$

Для частоты $\nu = \nu_0$ энергия фотона такова, что может быть совершена работа выхода и вылетающий электрон покинет поверхность катода с начальной скоростью равной нулю.

Для кванта энергии с частотой $\nu < \nu_0$, т.е. при $h\nu < A$, электроны проводимости не могут выйти из катода за счет энергии поглощенного кванта, так как этой энергии недостаточно для

преодоления работы выхода, и фотоэффект не наблюдается. Частота, рассчитываемая по уравнению (2.6), даёт ту минимальную частоту, при которой возможен фотоэффект, т.е. определяет порог фотоэффекта и называется предельной, или граничной, частотой фотоэффекта. Длина волны λ_0 , соответствующая предельной частоте ν_0 и определяемая по формуле

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A}, \quad (2.7)$$

называется красной границей фотоэффекта. Величина λ_0 зависит от природы вещества, состояния поверхности катода и особенно от наличия плёнок адсорбированного газа. Для большинства веществ она лежит в ультрафиолетовой области спектра. Но у некоторых металлов с малой работой выхода (особенно у щелочных – Na, K, Rb, Cs) наблюдается фотоэффект при видимом свете и красная граница лежит в видимой и инфракрасной областях спектра.

Электроны, вылетающие из катода фотоэлемента под действием света, обладают определённой кинетической энергией и, достигая анода, создают в замкнутой цепи, составленной из фотоэлемента и гальванометра, ток. Если между анодом и катодом создать электрическое поле, приложив разность потенциалов, то можно затормозить электроны. Методом задерживающего потенциала обычно пользуются при измерении энергии фотоэлектронов. Те электроны, кинетическая энергия которых удовлетворяет условию $\frac{mv_{\max}^2}{2} < eU_0$, не могут достичь анода. Поэтому при увеличении напряжения U анодный ток падает, и при некотором значении разности потенциалов (потенциал запираения) даже самые быстрые фотоэлектроны не могут достичь анода, и анодный ток в цепи прекращается.

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов связана с задерживающим потенциалом соотношением (2.4).

В задании № 3 экспериментально изучается зависимость фототока от величины приложенного задерживающего потенциала. Эта зависимость описывается плавной кривой, изображенной на рис. 2.5.

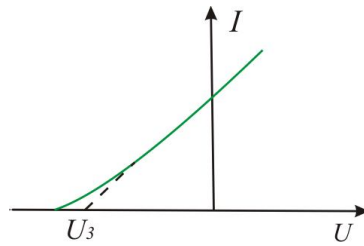


Рис. 2.5. Вольтамперная характеристика фотоэлемента при запирающем напряжении

Практический интерес представляет точка пересечения кривой с осью U при $I = 0$, определяющая потенциал запираения U_3 (рис. 2.5)

$$U_3 = \frac{h\nu}{e} - \frac{A}{e}.$$

Это есть уравнение прямой линии, откуда видно, что задерживающий потенциал U_3 зависит от частоты света ν , падающего на фотоэлемент.

При экспериментальной проверке уравнения Эйнштейна можно убедиться в том, что величина задерживающего потенциала зависит только от частоты света, причём линейно. Работу выхода электронов из металла и постоянную Планка можно определить, построив график зависимости задерживающего потенциала U_3 от частоты света ν (рис. 2.6): $\operatorname{tg}\alpha = h/e$, а отрезок B , отсекаемый от оси потенциала, даёт A/e . Точка пересечения прямой с осью абсцисс даёт численное значение граничной частоты ν_0 .

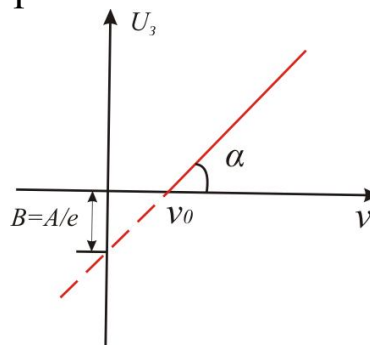


Рис. 2.6. Зависимость запирающего потенциала от частоты света

Иногда вместо частоты указывается длина волны λ_0 монохроматического света.

Если измерить величины задерживающего потенциала хотя бы для двух частот, то можно определить постоянную Планка и работу выхода электронов по формулам

$$h = \left(\frac{e}{\nu' - \nu''} \right) (U'_3 - U''_3) \quad (2.8)$$

$$A = \left(\frac{e}{\nu' - \nu''} \right) (U'_3 \nu'' - U''_3 \nu') \quad (2.9)$$

где U_3' и U_3'' – задерживающие потенциалы для частот ν' и ν'' .

Контрольные вопросы к заданию 2.3

1. Что понимают под красной границей фотоэффекта?
2. Каким уравнением определяется частота света при красной границе фотоэффекта?
3. Что понимают под термином «задерживающее напряжение»?
4. От чего зависит величина задерживающего потенциала?
5. Как связаны между собой граничная длина волны λ_0 и граничная частота ν_0 ?

Рекомендуемая литература: [5], [6], [9], [10], [11], [13], [14].

Задание 2.4 Снятие вольт-амперной характеристики электровакуумного фотоэлемента. Определение работы выхода (компьютерная модель)

Приборы и принадлежности: компьютерная модель виртуального лабораторного практикума изучения внешнего фотоэффекта [15].

Цель задания: снятие ВАХ электровакуумного фотоэлемента. Экспериментальная проверка закона Столетова.

Подготовка к заданию

Запустите программу «Открытая физика», в содержании найдите раздел «Квантовая физика», а затем виртуальную модель «Фотоэффект». Модель является компьютерным экспериментом по исследованию закономерностей внешнего фотоэффекта. Окно модели «Фотоэффект» представлено на рис. 2.7. Рассмотрим детально информационные поля этой компьютерной модели, их шесть.

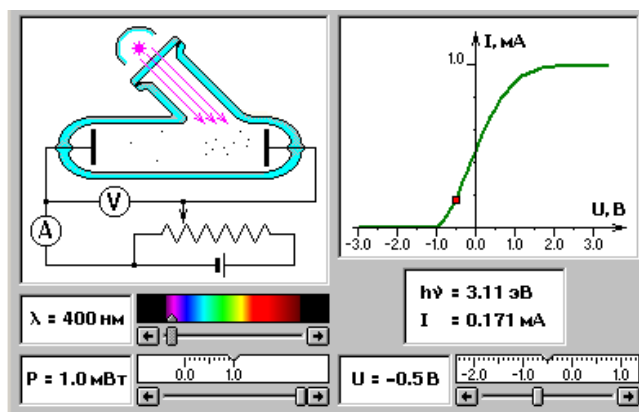


Рис. 2.7. Окно виртуальной модели «Фотоэффект»

На верхнем левом информационном поле изображена схема установки для изучения внешнего фотоэлемента. Световые лучи от источника излучения попадают на поверхность катода. Фотоэлектроны, перемещающиеся от катода к аноду, изображаются движущимися точками.

Левое среднее информационное поле содержит данные о численном значении длины волны падающего света λ , нм. Движок на линейке прокрутки позволяет изменять цвет источника света, перемещаясь от одной спектральной области к другой. Изменение длины волны сопровождается изменением окраски световых лучей, падающих на входное окно фотоэлемента.

Левое нижнее информационное поле отражает численное значение мощности падающего излучения. В реальном физическом эксперименте для изменения мощности падающего излучения можно изменить расстояние между источником света и фотоэлементом. В рассматриваемой компьютерной модели мощность излучения изменяется от 0,0 до 1,0 мВт, используя движок линейки прокрутки мощности. Электрическая схема виртуальной установки для изучения внешнего фотоэффекта содержит амперметр, вольтметр, реостат и источник питания. В верхнем правом информационном поле расположена вольтамперная характеристика фотоэлемента (зависимость фототока I в трубке от разности потенциалов U между анодом и катодом), полученной при заданной мощности излучения, а также данные о численном значении энергии кванта $h\nu$, эВ и силе тока в цепи I , мА. Красной точкой на графике выделено текущее значение параметров виртуального эксперимента – сила тока в цепи I при разности потенциалов U .

Значение разности потенциалов и полярность на фотоэлементе отображается в нижнем правом информационном поле. Напряжение изменяется с помощью движка на линейке прокрутки от $-3,0$ В до $+3,0$ В. Обратите внимание, что при переходе от запирающего напряжения к прямому изменяется полярность источника питания, изображенного на верхнем левом рисунке.

Порядок выполнения задания 2.4

1. Установите длину волны падающего излучения $\lambda = 380$ нм.
2. Установите мощность падающего излучения $P = 1$ мВт, подайте на фотоэлемент прямое напряжение. Понаблюдайте, как зависит фототок от напряжения, результаты измерений занесите в табл. 2.3.

Таблица 2.3

λ , нм	P, мВт	U, В	I, мА
		0,0	
		0,5	
		1,0	
		1,5	
		2,0	
		2,5	
		3,0	

3. Повторить п. 2 для значений $P = 0,7$ мВт; $P = 0,3$ мВт. Полученные результаты представить в виде продолжения табл. 2.3.
4. На листе миллиметровой бумаги построить семейство трех вольтамперных характеристик. Указать на графике значение мощности падающего излучения для каждой кривой.
5. Назвать особенности, которыми обладает каждая вольтамперная характеристика (наличие линейного и горизонтального участков).
6. Указать, как зависит от мощности падающего излучения положение участков насыщения ($I_{нас}$, мА) на вольтамперных характеристиках. Заполнить табл. 2.4.

Таблица 2.4

$\lambda, \text{нм}$	№	P, мВ	I _{нас} , мА
	1	1,0	
	2	0,7	
	3	0,3	

7. Самостоятельно сформулировать закон Столетова, используя данные табл. 2.4.

**Задание 2.5. Красная граница фотоэффекта.
Определение работы выхода $A_{\text{вых}}$ электрона
(виртуальная модель)**

Порядок выполнения задания 2.5

1. Установить мощность падающего излучения $P = 1$ мВ, пользуясь движком прокрутки мощности. Установите длину волны излучения $\lambda = 450$ нм. Проанализировать вольт-амперную характеристику, представленную в компьютерной модели. Пользуясь движком прокрутки напряжения, снять вольт-амперную характеристику при запирающем напряжении и заполнить табл. 2.5 экспериментальных значений.

Таблица 2.5

$\lambda, \text{нм}$	$h\nu, \text{эВ}$	U, В	I, мА
450	3,11	0,0	
		0,1	
		0,2	
		0,3	
		0,4	
		0,5	
		0,6	
		0,7	
		0,8	
		0,9	

2. Пользуясь таблицей, определить значение U_3 для заданной длины волны излучения ($U_3 = -1,1$ В).

3. Повторить п. 1 минимум для двух различных длин волн (500 нм, 550 нм).

4. Пользуясь табл. 2.3, найти U_3 для каждой длины волны. Заполнить табл. 2.6.

Таблица 2. 6

λ , нм	U_3 , В	$h\nu$, эВ
450	(1,1 В)	
500		
550		

5. Построить график зависимости потенциала запираания U_3 (В) от величины энергии фотона $h\nu$ (эВ).

6. Определить по графику граничную частоту ν_0 , по расчетным формулам значение работы выхода A (эВ). Значение постоянной Планка $h = 4,136 \cdot 10^{-15}$ эВ·с.

7. Сделать вывод о материале, из которого изготовлен катод. стр. 665.

Контрольные вопросы к заданию 2.5

1. В чем заключается явление внешнего фотоэффекта?
2. Какова суть законов фотоэффекта?
3. Из каких участков состоит вольтамперная характеристика вакуумного фотоэлемента?
4. Как формулируется уравнение Эйнштейна для фотоэффекта?
5. Что называется работой выхода электрона из металла?
6. Что понимают под красной границей фотоэффекта?
7. Каким уравнением определяется частота света при красной границе фотоэффекта?
8. Что понимают под термином задерживающее напряжение?
9. От чего зависит величина задерживающего потенциала?
10. Как связаны между собой граничная длина волны λ_0 и граничная частота ν_0 ?

Лабораторная работа 3

ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА. ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Задание 3.1. Проверка закона Малюса

Приборы и принадлежности: источник света (лампа накаливания); два поляроида в оправе; селеновый фотоэлемент; ампервольтметр Щ-302.

Цель работы: экспериментальная проверка закона Малюса.

Краткая теория

С точки зрения электромагнитной теории, свет представляет собой поперечные электромагнитные волны. Векторы напряженности электрического поля \vec{E} и магнитного поля \vec{H} колеблются во взаимно перпендикулярных плоскостях. Плоскостью колебаний называется плоскость, проходящая через световой луч и направление колебаний электрического вектора.

В естественном свете плоскость световых колебаний хаотически меняет своё направление в пространстве; в плоскополяризованном свете колебания электрического вектора совершаются в определенном направлении.

Выделение колебаний, происходящих в какой-либо одной плоскости, из естественных колебаний называется поляризацией света.

Получить поляризованный свет можно следующими способами.

1. При отражении от неметаллического зеркала (стекло, вода и пр.). При этом в общем случае свет получается частично поляризованным. Степень поляризации зависит и от угла падения световой волны на зеркало. Поляризация делается полной, когда тангенс угла падения равен показателю преломления вещества, из которого сделано зеркало. Этот угол называется углом полной поляризации (углом Брюстера), для стекла он равен 57° . При полной поляризации плоскость колебаний отражённой волны перпендикулярна к её плоскости падения.

2. Путём преломления в стеклянной пластинке. Здесь поляризация всегда неполная; своей наибольшей величины она достигает при угле падения, равном углу полной поляризации отраженной волны. Но в то время как отраженная волна при угле полной поляризации будет полностью поляризована, в преломлённом пучке поляризованного света будет лишь столько, сколько его имеется в пучке отраженном. Например, из светового пучка, падающего на поверхность стекла под углом полной поляризации, отражается только $1/7$ часть, а $6/7$ проходят через стекло. В проходящем пучке поляризованного света будет только $1/7$ часть, остальные $5/7$ остаются естественным светом. Чтобы достичь большей степени поляризации в преломленном световом пучке, его пропускают под углом поляризации (57°) через стопку тонких стеклянных пластинок, наложенных одна на другую (обыкновенно бывает достаточно 8–10 пластинок). Плоскость колебаний преломленной волны параллельна к её плоскости падения. Следовательно, плоскости колебания отражённой и преломлённой волн взаимно перпендикулярны.

3. Третий способ получения поляризованного света основан на явлении двойного лучепреломления в кристаллах (рис. 3.1), которое наблюдается в анизотропных средах (анизотропной называется среда, физические свойства которой в разных направлениях различны). Анизотропной средой будут, например, кристаллы кварца и исландского шпата.

На рис. 3.1 показано прохождение света через кристалл исландского шпата.

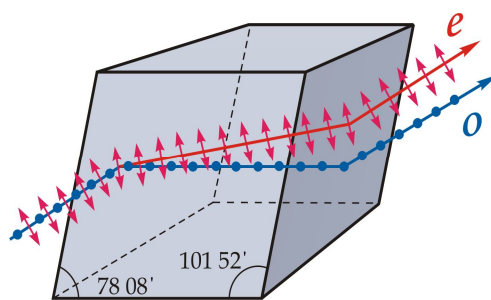


Рис. 3.1. Прохождение света через кристалл исландского шпата (CaCO_3), где o – обыкновенный луч; e – необыкновенный луч

Естественный луч разделяется в кристалле на два луча: e и O . Луч e называется необыкновенным лучом, так как его показатель преломления зависит от направления распространяющегося луча, и,

следовательно, в различных направлениях в кристалле он распространяется с различными скоростями. Луч O называется обыкновенным лучом, так как он подчиняется законам преломления, и скорость его в кристалле не зависит от направления.

Оба вышедших из кристалла луча поляризованы. Колебания в необыкновенном луче совершаются в плоскости главного сечения кристалла (луч отмечен чёрточками), а в обыкновенном луче – в плоскости, перпендикулярной главному сечению (луч отмечен точками). Свойства обоих лучей, вышедших из кристалла, за исключением направления поляризации, абсолютно одинаковы рис. 3.2.

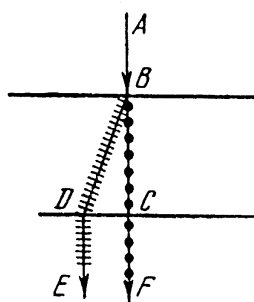


Рис. 3.2. Двойное лучепреломление в анизотропной среде

Чтобы использовать такие поляризованные лучи для технических целей, их надо отделить один от другого. Это осуществляется в призме Николя. Для изготовления такой призмы естественный кристалл исландского шпата подпиливают определенным образом, затем он распиливается по линии AR (рис. 3.3), и обе половины склеиваются «канадским бальзамом».

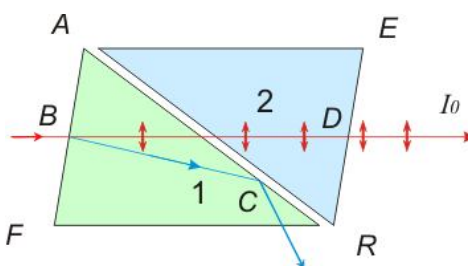


Рис. 3.3. Конструкция призмы Николя

Обыкновенный луч 1, дойдя до слоя канадского бальзама AR , испытывает полное внутреннее отражение (рис. 3.3), так как показатель преломления исландского шпата для обыкновенного луча больше показателя преломления канадского бальзама. Таким

образом, обыкновенный луч отводится в сторону и поглощается в оправе Николя.

Необыкновенный луч 2 проходит сквозь слой канадского бальзама, не преломляясь, так как показатель преломления исландского шпата для необыкновенного луча меньше показателя преломления «канадского бальзама».

При помощи призмы Николя можно: 1) получить поляризованный луч; 2) определить направление колебаний в нем. В первом случае призма Николя служит поляризатором, а во втором – анализатором.

Две призмы Николя, расположенные последовательно, не пропускают лучей, если они скрещены, т.е. если их главные сечения перпендикулярны. Если же их главные сечения параллельны, то интенсивность света, прошедшего анализатор, будет максимальной.

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

Если последовательно пропускать пучок лучей света через поляризатор и анализатор, то амплитуда прошедшей волны будет зависеть от угла между направлениями колебаний вектора электрической напряжённости световой волны и направлениями колебаний, пропускаемыми поляризатором и анализатором. Пусть $ПП$ – направление колебаний вектора электрической напряжённости, пропускаемых поляризатором, $АА$ – анализатором (рис. 3.4). Главные направления поляризатора и анализатора составляют между собой некоторый угол φ .

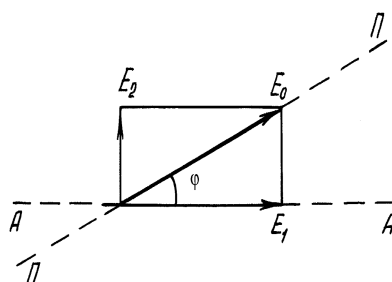


Рис. 3.4. Разложение вектора \vec{E}_0 , вышедшего из поляризатора $ПП$, анализатора $АА$, на две составляющие

E_0 – амплитуда вектора напряженности колебания, пропускаемого поляризатором. Амплитуду E_0 разложим на две взаимно перпендикулярные составляющие E_1 и E_2 , одна из которых совпадает с главным направлением анализатора. Колебания, перпендикулярные направлению $АА$, не проходят через анализатор.

Из рис. 3.4 видно, что амплитуда выходящего из анализатора света равна

$$E_1 = E_0 \cos \varphi ,$$

где φ – угол между направлениями колебаний электрического вектора световой волны, пропускаемых анализатором и поляризатором.

Так как интенсивность света J пропорциональна квадрату амплитуды, то

$$J = J_0 \cos^2 \varphi , \quad (3.1)$$

где J – интенсивность прошедшего света; J_0 – интенсивность падающего на анализатор света.

Соотношение (1) носит название закона Малюса. Если $\cos \varphi = 1$, то $J = J_0$. Таким образом, J_0 есть интенсивность света в случае совпадения главных направлений поляризатора и анализатора.

Порядок выполнения задания 3.1

1. На рис. 3.5 приводится схема экспериментальной установки. Работа выполняется в затемненном помещении. Перемещая лампу накаливания, добиться максимального освещения поляроида, затем включить в сеть прибор Щ-302 (кнопки «авт.» и «I» отжаты).

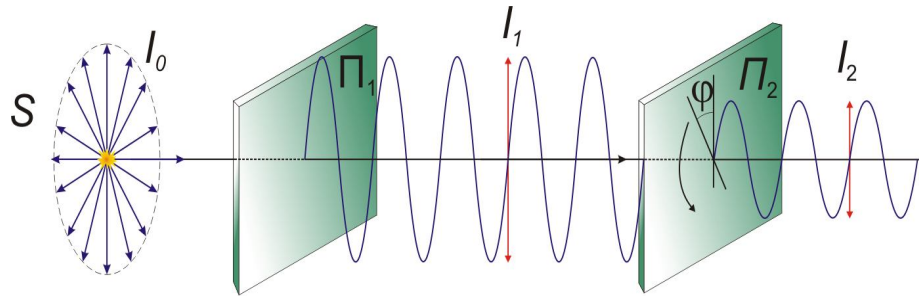


Рис. 3.5. Схема экспериментальной установки для проверки закона Малюса: S – источник света (лампа накаливания); Π_1 – поляризатор; Π_2 – анализатор; I_0 – интенсивность естественного света; I_1, I_2 – интенсивность поляризованного света; φ – угол между направлениями колебаний электрического вектора световой волны, пропускаемых анализатором и поляризатором

В используемой экспериментальной установке поляроид, обращенный к источнику света, вращается. Второй поляроид закреплен перед фотоэлементом неподвижно. Вращая поляроид, добиться максимального значения показаний ампервольтметра. Записать значения угла φ и силы тока I .

Поворачивайте поляроид на 360° и через каждые 10° (до завершения полного оборота) определить и записывать показания ампервольтметра. Повторите измерения, меняя угол от 360° до 0° . Усреднить результаты.

2. Построить график зависимости силы фототока I , пропорциональной интенсивности J прошедшего света, от угла поворота φ .

3. Определить степень поляризации света по формуле

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

4. Построить график зависимости силы фототока I от $\cos^2\varphi$.

Контрольные вопросы к заданию 3.1

1. Какой свет называется плоскополяризованным?
2. В чём состоит явление двойного лучепреломления?
3. Что такое оптическая ось?
4. Какие плоскости в кристалле называют главными?
5. Почему интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды вектора \vec{E} ?
6. Как формулируется закон Брюстера?

Задание 3.2. ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ. ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА (компьютерная модель)

Приборы и принадлежности: компьютерная модель виртуального лабораторного практикума «Изучение вращения плоскости поляризации». Проверка закона Малюса.

Цель задания: проверка закона Малюса.

Подготовка к заданию

1. Запустите программу «Открытая физика», в содержании найдите раздел «Оптика», а затем – виртуальную модель «Поляроиды». Модель является компьютерным экспериментом по проверке закона Малюса. Окно модели «Поляроиды» представлено на рис. 3.6. Рассмотрим детально информационные поля этой компьютерной модели, их шесть.

На рис. 3.6 изображен источник света I_0 , поляризатор 1. После прохождения неполяризованного света через поляроид свет становится линейно поляризованным, направления колебаний которого представлено вертикальными стрелками. 2 – анализатор (поляроид), который анализирует вышедший из поляризатора свет. Если естественный свет проходит через два установленных поляроида, то интенсивность прошедшего света зависит от угла $\Delta\varphi$ между главными направлениями поляроида.

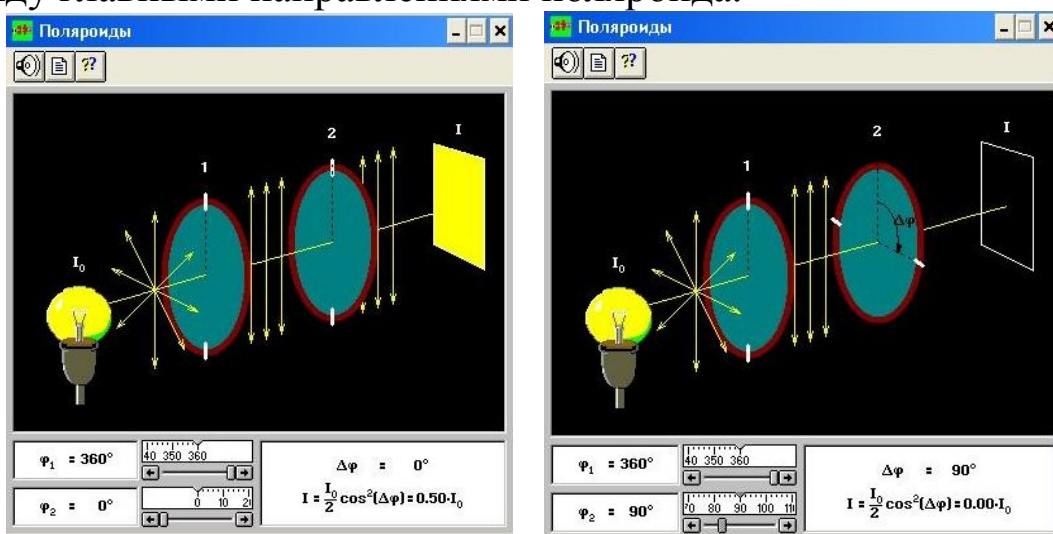


Рис. 3.6 . Окно виртуальной модели «Поляроиды».

Если $\Delta\varphi=0$, то $I_0 = \frac{I_0}{2} \cos^2(\Delta\varphi) = 0.5I_0$.

Если $\Delta\varphi=90^\circ$, то $I_0 = \frac{I_0}{2} \cos^2(\Delta\varphi) = 0.00I_0$

Изменяя значения угла $\Delta\varphi$ от 0° до 360° с шагом 10° ,
заполнить табл.3.1

Таблица 3.1

$\Delta\varphi$	I	I/I_{max}	$\cos^2 \varphi$
0			
10			
20			
...			
360			

3. По полученным результатам построить график зависимости силы фототока от $\Delta\varphi$.

4. Степень поляризации света определить по формуле

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

5. Построить график зависимости силы фототока от $\cos^2 \Delta\varphi$.

6. Сравнить полученные результаты в задании 3.1 и задании 3.2.

Контрольные вопросы к лабораторной работе 3

1. Какой свет называется плоскополяризованным?
2. В чем состоит явление двойного лучепреломления?
3. что такое оптическая ось?
4. Почему интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды вектора E ?
5. Как формулируется закон Брюстера?

Рекомендуемая литература: [5], [7], [8], [9], [10], [12], [14].

Лабораторная работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ И МИКРОСКОПА

Задание 4.1. Определение увеличения и поля зрения оптической трубы

Приборы и принадлежности: оптическая труба; стенной масштаб; рулетка.

Цель задания: определение увеличения и поля зрения оптической трубы.

Краткая теория

Для наблюдения удаленных космических объектов часто используют астрономическую зрительную трубу (трубу Кеплера), при наблюдении наземных объектов удобнее использовать зрительную трубу Галилея.

Каждый из этих оптических приборов состоит из двух частей: объектива-линзы, обращенной к объекту, и окуляра-линзы, обращенной к наблюдателю. Объектив, в качестве которого всегда используется положительная линза, создает действительное изображение предмета. Это изображение рассматривается глазом через окуляр. Ход лучей в астрономической и земной зрительных трубах представлен на рис. 4.1 и 4.2.

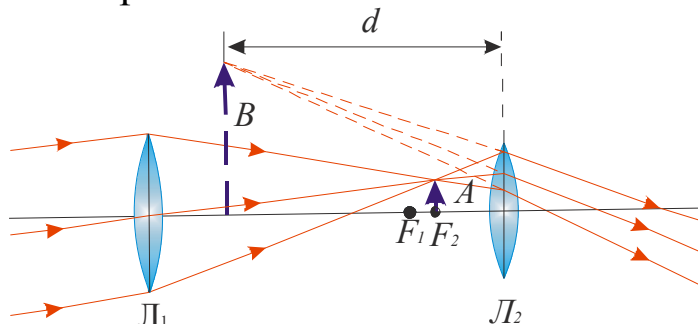


Рис. 4.1. Ход лучей в астрономической зрительной трубе (трубе Кеплера)

Поскольку зрительные трубы используются для наблюдения удаленных предметов, находящихся от объектива на расстояниях, превышающих его фокусное расстояние, изображение A предмета, даваемое объективом, находится практически в его фокальной плоскости.

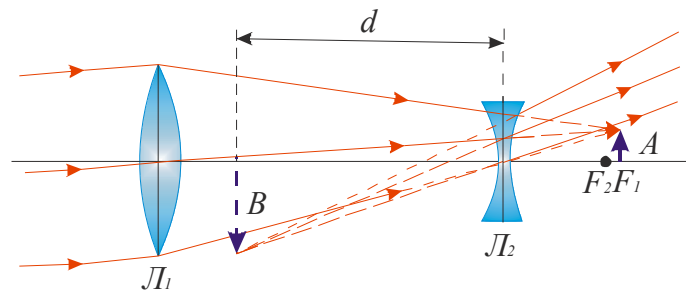


Рис. 4.2. Ход лучей в галилеевой зрительной трубе

Мнимое изображение B , даваемое окуляром, располагается на некотором расстоянии d от окуляра. Наводя оптический инструмент на резкость, наблюдатель автоматически устанавливает такое расстояние d , которое удобно для аккомодации (приспособления) глаза. Поскольку глаз обладает значительной областью аккомодации, расстояние d для одного и того же наблюдателя может существенно изменяться от опыта к опыту. При изменении аккомодации оптический прибор, вооружающий глаз, должен быть несколько перефокусирован. В зрительных трубах этого достигают перемещением окуляра. Для того чтобы исключить в теории произвол, связанный с неопределенностью расстояния d , полагают обычно, что глаз наблюдателя аккомодирован на бесконечность. При этом мнимое изображение B должно располагаться в бесконечности и, следовательно, промежуточное изображение A должно совпадать с фокальной плоскостью окуляра.

При наблюдении предметов с помощью зрительной трубы угловой размер изображения, рассматриваемого глазом, оказывается существенно больше, чем угловой размер объекта при наблюдении невооруженным глазом. Отношение тангенсов углов зрения, под которым видны изображение и предмет, называют угловым увеличением оптического прибора. В случае зрительной трубы всегда предполагается, что расстояние между объектом и наблюдателем значительно превышает фокусное расстояние объектива.

Увеличение астрономической зрительной трубы

При наблюдении далеких предметов с помощью астрономической зрительной трубы (трубы Кеплера) глазом,

аккомодированным на бесконечность, задний фокус объектива совпадает с передним фокусом окуляра. В этом случае труба является афокальной системой: параллельный пучок лучей, входящий в объектив, остается параллельным на выходе из окуляра. Такой ход лучей называют телескопическим.

Рассмотрим параллельный пучок лучей, исходящий из бесконечно удаленной точки, лежащей в стороне от оптической оси (рис. 4.3). Лучи, выходящие из окуляра, снова оказываются параллельными, но угол их наклона к оптической оси при этом изменяется.

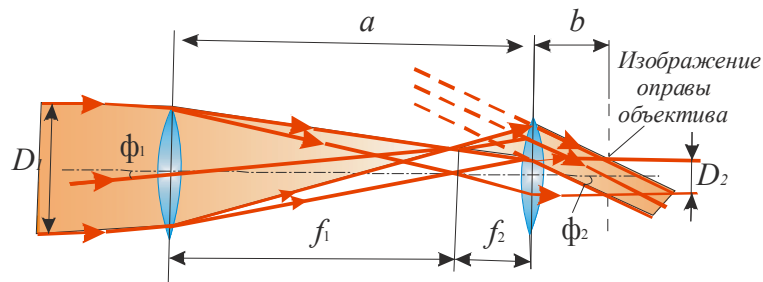


Рис. 4.3. Оптическая схема к расчету увеличения астрономической зрительной трубы

Пусть пучок света, падающий в объектив, составляет с оптической осью угол φ_1 , а пучок, выходящий из окуляра, – угол φ_2 . Увеличение γ зрительной трубы по определению равно

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg}\varphi_2}{\operatorname{tg}\varphi_1}. \quad (4.1)$$

Ширина параллельного пучка лучей, входящих в объектив, определяется диаметром D_1 его оправы, ширина пучка, выходящего из окуляра, определяется диаметром D_2 изображения оправы объектива, даваемого окуляром. На основании простых геометрических соотношений, очевидных из рис. 4.3, имеем

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{D_1}{D_2}, \quad (4.2)$$

$$\frac{\operatorname{tg}\varphi_2}{\operatorname{tg}\varphi_1} = \frac{f_1 + f_2}{b} = \frac{D_1}{D_2}. \quad (4.3)$$

С помощью (4.2) и (4.3) для увеличения γ найдем

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg}\varphi_2}{\operatorname{tg}\varphi_1} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{D_1}{D_2}. \quad (4.4)$$

Соотношение (4.4) показывает, что увеличение трубы можно определить тремя способами: путем измерения углов, под которыми предмет виден без трубы и через трубу, путем измерения диаметров объектива и его изображения в окуляре и, наконец, путем измерения фокусных расстояний объектива и окуляра. В настоящей работе используется первый способ.

Увеличение галилеевой зрительной трубы

Если заменить положительный окуляр астрономической трубы отрицательным, получается галилеева (или земная) труба. При телескопическом ходе лучей в галилеевой трубе расстояние между объективом и окуляром равно разности (точнее алгебраической сумме) их фокусных расстояний (рис. 4.4), а изображение оправы объектива, даваемое окуляром, оказывается мнимым. Это изображение располагается между окуляром и объективом. Легко показать, что формула (4.4), выведенная для астрономической трубы, справедлива и для земной трубы.

Достоинством галилеевой трубы является то, что она дает прямое изображение. Поэтому зрительные трубы, бинокли и т.д. делаются по схеме Галилея.

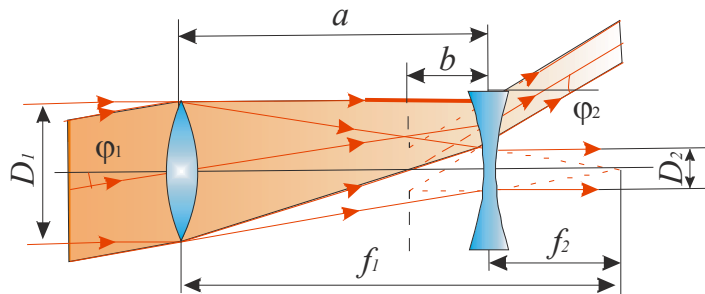


Рис. 4.4. Оптическая схема к расчету увеличения галилеевой зрительной трубы

Пусть l_0 – предмет, отстоящий на расстоянии d_0 от глаза наблюдателя (точки O), l – изображение предмета, видимое в трубу и находящееся на расстоянии d от точки O ; α_0 и α – соответствующие углы зрения. Согласно определению увеличение

$$Y = \frac{\text{tg}\alpha}{\text{tg}\alpha_0} = \frac{l}{d} \cdot \frac{l_0}{d_0} = \frac{ld_0}{l_0d}$$

Спроецируем изображение l на плоскость предмета при помощи центральной проекции с центром в точке O , т.е. так, чтобы

все точки изображения переместились вдоль лучей, соединяющих их с глазом наблюдателя. Спроецированное таким образом изображение займет положение L . Очевидно, что угол зрения, под которым видна эта проекция, – α , а расстояние ее от глаза есть d_0 . В этом случае увеличение

$$Y = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha_0} = \frac{L}{l_0}.$$

Пусть предмет представляет собой шкалу, длина одного деления которого есть l_0 . Если теперь выбрать такой отрезок шкалы, чтобы на нем улеглось n делений предмета и N делений изображения, где n и N числа целые и $n > N$, то можно записать, что $nl_0 = NL$ и, следовательно, увеличение трубы равно

$$Y = \frac{L}{l_0} = \frac{n}{N}.$$

Если предмет расположен не так, как указано на рис. 4.5, а пересекает ось прибора, то выражение не изменится. В этом можно легко убедиться, сделав соответствующее построение.

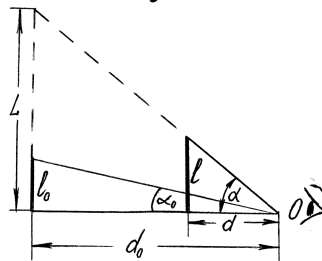


Рис. 4.5. Иллюстрация к расчету увеличения трубы путем измерения тангенсов углов

Порядок выполнения задания 4.1

Навести трубу на стенной масштаб, находящийся от трубы на расстоянии нескольких метров, и сфокусировать ее на линейку с делениями. Отсчитывать число N делений, видимых в трубу. Одновременно вторым, невооруженным глазом смотрят мимо трубы на стенной масштаб. Добиваться того, чтобы изображение в трубе налагалось на видимый невооруженным глазом масштаб, и отметить границы поля зрения трубы (рис. 4.6).

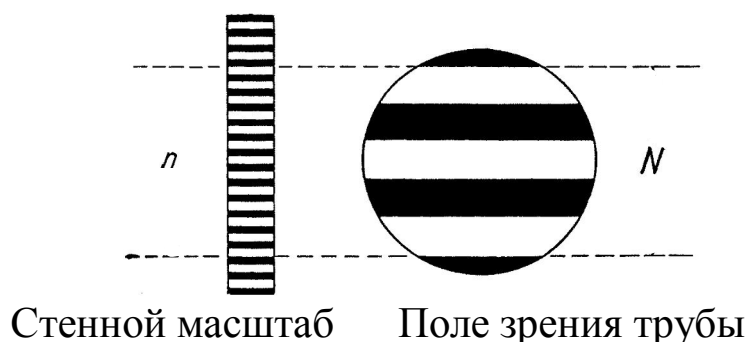


Рис. 4.6. Определение увеличения трубы

Всю эту операцию удобнее делать вдвоем – один смотрит в трубу, другой стоит возле масштаба, отмечает границы поля зрения трубы (верхнюю и нижнюю) и считает число делений стенового масштаба n , совпадающих с делениями N его изображения, видимыми в трубу. Увеличение трубы находят по формуле

$$\gamma = \frac{n}{N} \quad (4.5)$$

и вычисляют погрешности. Таким способом можно производить определения увеличения только при малых увеличениях. Этот метод неточен, потому что условия опыта не соответствуют условиям применения трубы: зрительная труба применяется для наблюдения достаточно удаленных объектов

Результаты измерений и вычислений заносят в табл. 4.1.

Таблица 4.1

№ п/п	Увеличение трубы			Поле зрения трубы		
	Число делений шкалы, n	Число делений шкалы N , видимых в трубу	Увеличение $\gamma = n/N$	Размер изображения aN , см (a – цена деления масштаба)	Расстояние от трубы до масштаба S , см	Поле зрения, $2\alpha = 57,3aN/S$
1						
2						
3						
4						
5						
Среднее значение						
Погрешность						

Контрольные вопросы к заданию 4.1

1. Для каких целей служит зрительная труба?
2. Как устроена зрительная труба?
3. Что называется увеличением оптической трубы?
4. Что называется полем зрения трубы?
5. Как определяется увеличение и поле зрения оптической трубы при помощи линейки?
6. Чем отличается зрительная труба Кеплера от трубы Галилея?

Задание 4.2. Определение увеличения микроскопа при помощи рисовального аппарата

Приборы и принадлежности: микроскоп; объект-микрометр; рисовальный прибор; горизонтальный миллиметровый масштаб (миллиметровая бумага на подставке); линейка масштабная.

Цель задания: экспериментальное определение увеличения микроскопа при помощи рисовального аппарата.

Краткая теория

Лучи от какого-либо источника света (окна или лампы) падают на зеркало $З$ (рис. 4.7) и, отражаясь от него, направляются через отверстие диафрагмы $Д$ в конденсор $К$.

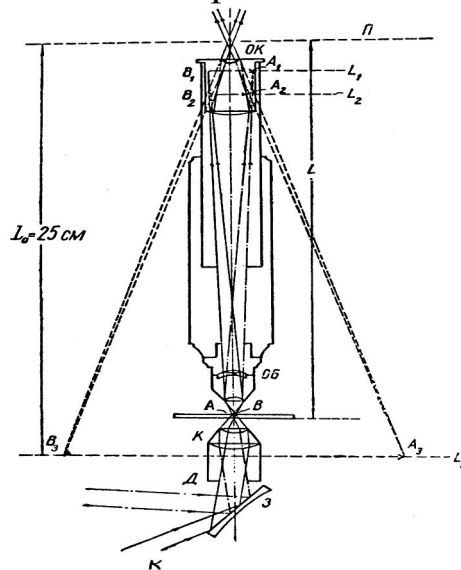


Рис. 4.7. Схема простого микроскопа

Выйдя из последнего, они сильно сходящимся пучком попадают на предмет AB , помещенный на плоскопараллельной пластинке несколько дальше главного фокуса объектива и одновременно в фокусе конденсора. Дальше лучи света попадают на объектив. Пройдя его, лучи слабо сходящимся пучком идут до окуляра и должны дать в плоскости L_1 , сопряженной с полоскостью объекта, увеличенное, обратное, действительное изображение A_1B_1 . Но на пути их находится собирательная линза окуляра, преломляясь в которой, лучи сходятся несколько ближе к объективу в плоскости L_2 и дают изображение A_2B_2 . В этой плоскости, положение которой определяется для данного микроскопа длиной тубуса, помещается диафрагма, ограничивающая поле зрения, т.е. являющаяся диафрагмой поля зрения. Положение её в большинстве микроскопов соответствует длине тубуса, равной 160 мм. Так как плоскость L_2 лежит ближе к центру глазной линзы окуляра, чем её главное фокусное расстояние, то действие этой линзы сводится к действию простой лупы, заставляющей лучи света, идущие от изображения A_2B_2 , еще более расходиться и создавать мнимое, обратное по отношению к объекту и ещё более увеличенное изображение A_3B_3 , лежащее в плоскости L_3 , положение которой зависит от установки тубуса микроскопа. Ход лучей в окуляре изображен на рис. 4.8.

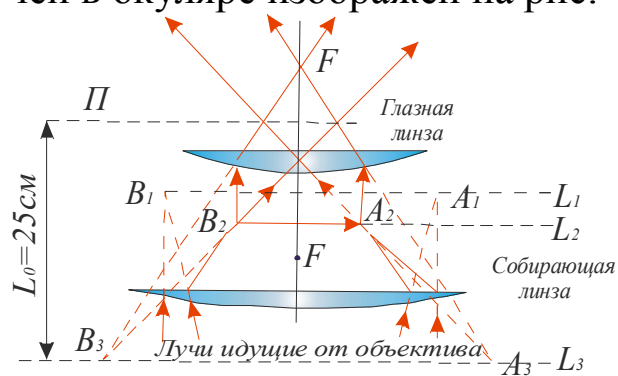


Рис. 4.8. Ход лучей в окуляре Гюйгенса

Обычно плоскость L_3 устанавливается наблюдателем при наводке на резкость на расстоянии наилучшего зрения его глаза. Через микроскоп видят значительно увеличенное изображение по отношению к самому предмету. Фокусировка микроскопа, т.е. установка его на резкость изображения предмета, производится перемещением тубуса микроскопа относительно предмета с помощью кремальеры (винта).

Увеличение микроскопа складывается из увеличения объектива и окуляра. Если объектив рассматривать как проекционный прибор, то величина изображения A_1B_1 представляется формулой

$$A_1B_1 = \frac{AB\Delta}{F_1}, \quad (4.6)$$

где F_1 – главное фокусное расстояние объектива; Δ – расстояние от центра объектива до изображения.

Действие обеих линз окуляра можно заменить действием эквивалентной линзы с фокусным расстоянием F_2 (лупой). В этом случае ход лучей в микроскопе можно изобразить упрощенно (рис 4.9).

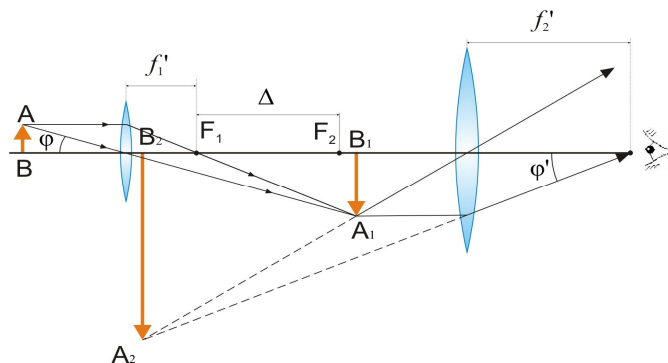


Рис. 4.9. Ход лучей в простом микроскопе

Для лупы справедливо соотношение

$$A_2B_2 = A_1B_1 \frac{L_0}{F_2}, \quad (4.7)$$

где L_0 – расстояние наилучшего зрения глаза наблюдателя.

Согласно формуле (4.1) имеем:

$$A_2B_2 = AB \frac{\Delta L_0}{F_1 F_2}.$$

Тогда поперечное (линейное) увеличение микроскопа будет

$$\Upsilon = \frac{A_2B_2}{AB} = \frac{\Delta L_0}{F_1 F_2}. \quad (4.8)$$

Так как изображение A_1B_1 должно лежать весьма близко к главному фокусу окуляра, а фокусное расстояние объектива весьма мало, то с достаточной точностью можно считать Δ равным расстоянию между верхним фокусом объектива и нижним фокусом окуляра, которое называется оптической длиной микроскопа. Субъективное увеличение микроскопа определяется формулой

$$\Upsilon = \frac{\text{tg}\alpha}{\text{tg}\alpha_0},$$

где α и α_0 – углы зрения изображения A_2B_2 и предмета AB .

Из рис. 4.10 ясно, что

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{A_2B_2}{L_0},$$

$$\operatorname{tg}\alpha_0 = \frac{AB}{l},$$

где l – расстояние от объекта до плоскости Π , в которой помещается глаз наблюдателя; L_0 – расстояние наилучшего зрения.

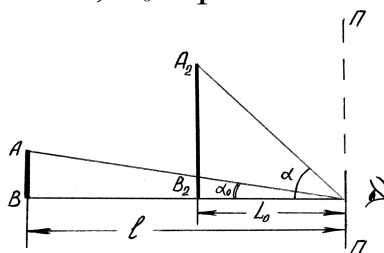


Рис. 4.10. Определение увеличения микроскопа

Следовательно,

$$\gamma = \frac{A_2B_2}{AB} \frac{l}{L_0} \quad (4.9)$$

Используя формулу (3), находим субъективное увеличение

$$\gamma' = \gamma \frac{l}{L_0} \quad (4.10)$$

Описание конструкции микроскопа

Микроскоп состоит из следующих составных частей (рис. 4.11): зеркала 1; предметного столика 2; ахроматических объективов 3; тубуса 4; окуляров 5; механизма грубой фокусировки 6; микрометрического механизма 7; держателя тубуса 8; основания 9.

Основание 9 представляет собой отливку подковообразной формы с тремя опорными площадками.



Рис. 4.11. Общий вид микроскопа

Тубус состоит из двух частей, в верхнюю часть вставляют окуляры, в нижнюю ввёртываются объективы. Микрометрический механизм 7 служит для обеспечения точной фокусировки микроскопа. Маховичок микрометрического механизма жёстко соединён с барабаном, по окружности которого нанесено 50 делений. Один оборот барабана соответствует линейному перемещению тубуса на 0,1 мм, два штриха на направляющей показывают диапазон перемещения тубуса микрометрическим механизмом. С помощью этого можно определить также толщину исследуемого под микроскопом прозрачного объекта путем двух последовательных фокусировок на верхнюю и нижнюю его поверхности и отсчётов показаний на барабане.

Предметный столик 2 посредством кронштейна соединен с держателем тубуса. Для зажима препарата на столике имеются пружинящие клеммы. Снизу к столику крепится гильза для установки сменных диафрагм. На каждом из ахроматических объективов 3 (сменных) нанесены увеличение и апертура.

Механическая длина тубуса – 160 мм, толщина покровного стекла – 0,17 мм. Окуляры Гюйгенса изготовлены так, что при замене одного из них другим изображение остается в той же плоскости. На каждом окуляре нанесено его увеличение.

Зеркало 1, вращающееся вокруг оси, позволяет наилучшим образом направить свет от источника освещения на наблюдаемый объект.

Описание рисовального аппарата

Объект-микрометр представляет собой стеклянную пластину с делениями в 0,1 мм или 0,01 мм. Рисовальный аппарат (рис. 4.12) состоит из двух призм в оправе и зеркала.

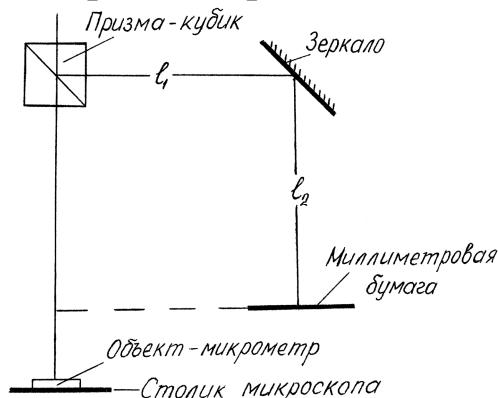


Рис. 4.12. Принцип работы рисовального аппарата

Он позволяет наблюдать объект, который находится в стороне от направления визирования.

Порядок выполнения задания 4.2

1. Объект-микрометр поместить на предметный столик микроскопа и перемещением тубуса микроскопа получить резкое изображение деталей микрометра. Это делается следующим образом. Действуя кремальерой осторожно, чтобы не раздавить микрометр, опустить тубус микроскопа так, чтобы объектив был в непосредственной близости от микрометра, но не касался его. Смотри в микроскоп и действуя кремальерой, медленно поднять тубус. Уловить момент до появления изображения делений микрометра. Окончательную установку микроскопа на резкое изображение делений производить микрометрическим винтом.

2. Укрепить рисовальный аппарат сверху окуляра микроскопа.

3. Перед микроскопом, на расстоянии $l=25$ см (расстояние наилучшего зрения для нормального глаза, рис. 4.12) от призмы, расположить горизонтально на подъёмном столике миллиметровый масштаб (миллиметровую бумагу).

4. Смотреть через отверстие в оправе призмы в микроскоп и придать зеркалу рисовального прибора такое положение, чтобы одновременно были видны деления объект-микрометра и горизонтальная миллиметровая шкала. Заметить число делений

шкалы, совпадающее с одним или с несколькими делениями микрометра.

Пусть N_1 делений шкалы по a_1 мм каждое совпало с N_2 делениями микрометра по a_2 мм каждое; тогда увеличение микроскопа равно

$$\gamma = \frac{N_1 a_1}{N_2 a_2}$$

Увеличение определять несколько раз, производя отсчёты в разных частях микрометра. Данные измерения записывают в табл.4.2.

Таблица 4.2

№ п/п/	a_1	N_1	a_2	N_2	γ
1					
2					
3					
4					
5					
Среднее значений увеличения					
Абсолютная погрешность					
Относительная погрешность					
Окончательный результат					

Контрольные вопросы к заданию 4.2

1. Как устроен рисовальный аппарат?
2. Как определяется увеличение микроскопа при помощи рисовального аппарата?

Задание 4.3. Определение увеличения объектива микроскопа с помощью окулярного микрометра

Приборы и принадлежности: микроскоп; окулярный микрометр; объект-микрометр.

Цель задания: экспериментальное определение увеличения объектива микроскопа с помощью окулярного микрометра.

Устройство окулярного микрометра МОВ-1-15х

Микрометр окулярный винтовой МОВ-1-15х является принадлежностью к микроскопу и служит для измерения линейных размеров объектов, рассматриваемых в микроскоп. МОВ-1-15х состоит из 15-кратного окуляра с диоптрийной наводкой в пределах ± 5 диоптрий и отсчётного механизма. Пределы измерения от 0 до 8 мм.

В фокальной плоскости окуляра микрометра расположена неподвижная пластинка со шкалой (от 0 до 8), каждое деление которой равно 1 мм. В этой же плоскости расположена вторая пластинка с перекрестием и индексом (рис. 4.13). Эта пластинка соединена с точным микрометрическим винтом так, что при вращении микрометрического винта перекрестие и риски перемещаются в поле зрения окуляра относительно неподвижной шкалы.

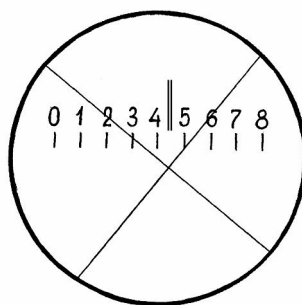


Рис. 4.13. Поле зрения окулярного микрометра

Шаг винта равен 1 мм. Таким образом, при повороте барабана винта на один оборот (шаг) риски и перекрестие в поле зрения перемещаются на одно деление шкалы. Следовательно, неподвижная шкала в поле зрения служит для отсчета полных оборотов винта, т.е. для отсчета полных миллиметров перемещения перекрестия окуляра. Барабан винта разделён на 100 частей. Следовательно, поворот барабана на одно деление соответствует перемещению перекрестия на 0,01 мм. Таким образом, шкала барабана служит для отсчета сотых долей миллиметра. Полный отсчет по шкалам окулярного микрометра складывается из отсчёта по неподвижной шкале и отсчета по барабану винта.

Отсчет по неподвижной шкале в поле зрения определяется положением рисок, т.е. подсчитывается, на сколько полных делений шкалы переместились риски, считая от нулевого деления

шкалы. В поле зрения по шкале окуляра отсчитываем полные миллиметры и видим, что риски не дошли до 5 деления, следовательно, отсчет будет 4,00 мм.

Отсчёт по барабану микрометрического винта производится точно так же, как и на обычном микрометре. Индекс барабана приходится против деления 45 шкалы барабана.

Так как цена одного деления шкалы барабана равна 0,01 мм, то отсчет по барабану будет 0,45 мм. Полный отсчёт по шкалам окуляра будет $4,00 \text{ мм} + 0,45 \text{ мм} = 4,45 \text{ мм}$.

Порядок выполнения задания 4.3

Для измерения линейного увеличения объектива микроскопа применяется объект-микрометр (он устанавливается на столик микроскопа) и окулярный микрометр, который одевается на окулярную трубку тубуса микроскопа до упора (сняв предварительно стандартный окуляр) и закрепляется на ней винтом. Если тубус микроскопа выдвижной, то следует установить выбранную длину тубуса.

После этого, вращая окуляр за накатанную часть, необходимо установить резкое изображение перекрестия. Далее, перемещая тубус микроскопа, следует получить резкое изображение шкалы объект-микрометра и после этого приступить к измерению увеличения объектива.

По шкале объект-микрометра взять некоторое число делений, укладывающихся в $2/3$ поля зрения окуляра. Не рекомендуется при измерении пользоваться всем полем зрения окуляра, так как на краю поля качество изображения несколько хуже, чем в центре.

Для удобства измерения объект-микрометр установить так, чтобы нулевой штришок его шкалы был расположен на расстоянии $1/3$ радиуса поля зрения от края. После этого, наблюдая в окуляр и вращая барабан, подвести центр перекрестия окуляра до совпадения с изображением нулевого штриха шкалы объект-микрометра и сделать по шкале окулярного микрометра отсчет.

Далее вращением барабана по часовой стрелке подвести центр перекрестия до совпадения с изображением штриха, который расположен приблизительно на расстоянии $1/3$ радиуса поля зрения от края, и сделать второй отсчёт по шкалам окулярного микрометра. Подсчитать число делений шкалы объект-микрометра,

принятых при измерении, вычислить разность отсчетов по шкалам окулярного микрометра и данные подставить в формулу

$$\gamma = \frac{\Delta z}{na},$$

где γ – линейное увеличение объектива; Δz – разность двух отсчетов по шкалам окулярного микрометра; n – число делений объект-микрометра, принятых при измерении; a – цена одного деления шкалы объект-микрометра.

Увеличение объектива микроскопа обычно обозначается на его оправе числом, за которым стоит знак \times . Это число обычно больше найденного опытным путем увеличения объектива. Несоответствие величин объясняется тем, что в окуляре Гюйгенса так называемая нулевая линза, обращенная к объективу, несколько уменьшает изображения объектива. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Отсчёт по шкале окулярного микрометра Z_i , мм		Разность отсчётов, мм			Увеличение γ
		ΔZ_{21} ($n=1$)	ΔZ_{32} ($n=1$)	ΔZ_{31} ($n=2$)	
Z_1			–	–	
Z_2		–		–	
Z_3		–	–		
Среднее значений увеличения					
Абсолютная погрешность					
Относительная погрешность					
Окончательный результат					

Контрольные вопросы к заданию 4.3

1. Как определить цену деления окулярного микрометра?
2. Как определить увеличение микроскопа с помощью окулярного микрометра?

Контрольные вопросы к лабораторной работе 4

6. Что такое апертурная диафрагма?
7. Что называется входным или выходным зрачком?
8. Каковы основные требования, предъявляемые к объективу микроскопа?
9. Что такое числовая апертура?

10. В чем заключается условие синусов?
11. Чем отличается апохромат от ахромата?
12. Какой объектив (ахромат или апохромат) входит в состав используемого в работе микроскопа?
13. Какие требования предъявляют к окуляру микроскопа?
14. Каково устройство окулярного микрометра?
15. Как устроен рисовальный аппарат?
16. Какая оптическая схема носит название телескопической?
17. Что означают цифры, нанесенные на объектив и окуляр микроскопа?
18. Как устроен объектив?
19. Под какими углами к главной оптической оси наклонены лучи, падающие на объектив зрительной трубы?
20. Отличаются ли окуляры микроскопа и зрительной трубы?
21. Какие лучи используют для построения изображений?

Рекомендуемая литература: [5], [7], [8], [9], [10], [12], [14].

Лабораторная работа 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА ПОЛЯРИМЕТРОМ

Приборы и принадлежности: осветитель; поляриметр; трубки с раствором сахара; линейка.

Цель работы: принцип работы прибора PL-1 (сахариметра универсального).

Краткая теория

Прибор, применяющийся в научных и технических исследованиях для получения поляризованного света, а также в медицине, и состоящий из поляризатора Π и анализатора A , называется **поляриметром**. Поляриметры, применяемые для определения концентрации раствора сахара, называются **сахариметрами** (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Оптическая схема сахариметра

Действие сахариметра основано на законе Малюса и на явлении вращения плоскости поляризации.

Явление вращения плоскости поляризации состоит в том, что после прохождения плоскополяризованного света через вещество плоскость поляризации (вектор E) оказывается повернутой относительно первоначального положения на некоторый угол φ , называемый углом поворота плоскости поляризации. Это явление имеет место в различных веществах, которые называются оптически активными. К ним относятся многие органические вещества, например, раствор сахара, а также некоторые кристаллы (кварц).

В зависимости от направления вращения плоскости поляризации различают право- и левовращающие вещества. Если смотреть навстречу лучу, то правовращающее вещество вращает

плоскость поляризации по часовой стрелке, а левовращающее – против часовой стрелки.

Опытным путем было обнаружено, что угол поворота плоскости поляризации φ можно найти следующим образом (закон Био):

$$\varphi = [\alpha]CL, \quad (5.1)$$

где L – длина цилиндра с оптически активным веществом; C – концентрация активного вещества; $[\alpha]$ – удельное вращение.

Удельным вращением $[\alpha]$ называется величина, численно равная углу поворота плоскости поляризации слоем раствора единичной толщины и единичной концентрации.

Удельное вращение характеризует природу вещества и обратно пропорционально квадрату длины волны используемого света и слабо зависит от температуры. Для большинства веществ $[\alpha]$ уменьшается на 0,001 при повышении температуры на 1°C .

В зависимости от направления вращения плоскости поляризации, оптически активные вещества подразделяют на правовращающие и левовращающие. Для объяснения вращения плоскости поляризации Френель предположил, что в оптически активных веществах лучи, поляризованные по кругу вправо и влево, распространяются с неодинаковой скоростью. Плоскополяризованный свет можно представить как суперпозицию двух поляризованных по кругу волн, правой и левой, с одинаковыми частотами и амплитудами. Действительно, геометрическая сумма E световых векторов E_1 и E_2 , поляризованных по кругу волн, в каждый момент времени будет лежать в одной и той же плоскости P (рис. 5.2).

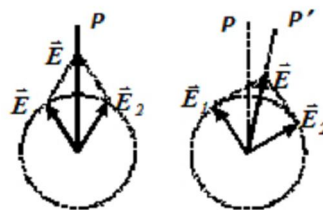


Рис. 5.2. Распределение поляризованных по кругу волн (правый и левый) в оптически активной среде

Если скорости распространения обеих волн окажутся неодинаковыми, то по мере прохождения через вещество один из векторов E_1 или E_2 будет отставать в своем вращении от другого

вектора, в результате чего плоскость P' , в которой лежит результирующий вектор E , будет поворачиваться относительно первоначальной плоскости P .

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

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

Описание лабораторной установки

Естественное вращение плоскости поляризации можно наблюдать, поместив оптически активное вещество между поляризатором и анализатором. Если главные плоскости поляризатора и анализатора взаимно перпендикулярны (скрещены), то плоскополяризованный свет, вышедший из поляризатора, в отсутствие оптически активного вещества будет целиком задержан анализатором и поле зрения будет темным.

Введение оптически активного вещества приводит к повороту плоскости поляризации, благодаря чему поле зрения просветлеет. Чтобы снова добиться минимума интенсивности света, необходимо на такой же угол повернуть анализатор, тем самым можно найти и угол поворота плоскости поляризации в исследуемом веществе.

Однако такой метод недостаточно точен, ибо визуально трудно найти верное положение анализатора, соответствующее максимальному затемнению поля зрения. Это объясняется тем, что затемнение поля происходит постепенно и заметить момент *полного* исчезновения света трудно.

Для устранения этого недостатка применяется так называемый полутеневого метод, который используется в поляриметре с бикварцевой пластинкой, в котором установка производится не на полную темноту, а на равномерное затемнение двух или более частей поля зрения (рис. 5.3.).

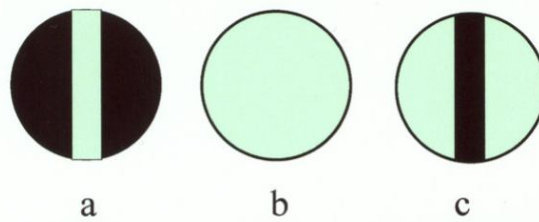


Рис. 5.3 Поле зрения полутеневого анализатора

В данном методе установка производится не на темноту поля зрения, а на равную яркость полей сравнения. Идея этого метода заключается в следующем.

В оптическую схему прибора, кроме поляризатора 4 и анализатора 7, вводят кварцевую пластинку 5 (рис.5.4) небольшой толщины, ориентированную по отношению к поляризатору так, что она поворачивает плоскость поляризации лучей, прошедших через поляризатор, на некоторый небольшой угол (около 5°).

Кварцевая пластинка вырезана так, что она покрывает собой лишь среднюю часть поля зрения, наблюдаемого в окуляре 10. Боковые же части поля зрения освещаются светом, прошедшим только через поляризатор. Если теперь установить анализатор так, чтобы его плоскость поляризации оказалась перпендикулярной к плоскости поляризации поляризатора, то свет в боковых частях поля зрения погасится, а через среднюю часть проходит заметный свет (рис. 5.3 а). При повороте анализатора на небольшой угол можно совершенно погасить среднюю часть поля зрения, но боковые части будут освещены (рис. 5.3 с). Очевидно, что найдется такое положение анализатора (рис. 5.3 б), при котором и боковые, и средняя часть поля зрения будут равномерно освещены (установка на полутень).

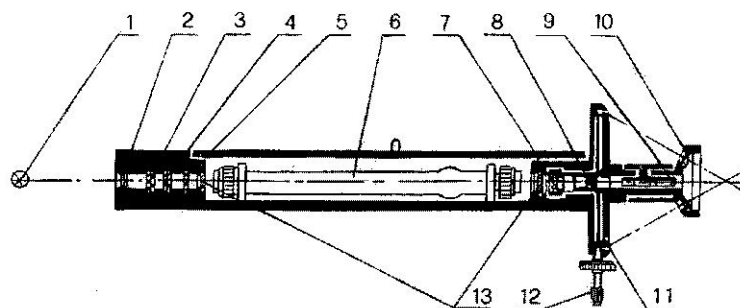


Рис. 5.4 Оптическая схема прибора

Если после установки прибора на полутень между поляризатором и анализатором ввести раствор сахара, то

равномерность освещения боковых и средней частей поля зрения нарушится; для получения равномерного освещения поля зрения нужно повернуть анализатор на угол, равный углу вращения плоскости поляризации луча вследствие прохождения им сахарного раствора.

Так как равенство освещенностей, при котором граница между областями поля зрения пропадает, можно установить с гораздо большей точностью, чем наступления минимальной освещенности, то полутеневой метод дает гораздо более точные результаты.

Используемый в работе прибор называется круговым поляриметром (рис.5.5).



Рис. 5.5. Поляриметр PL-1

Его схема показана на рис. 5.4. Свет от лампы 1 проходит через оранжевый светофильтр 3 и попадает в поляризатор 4. Далее свет проходит через кварцевую пластинку 5, трубку 6 с исследуемым веществом, анализатор 7 и зрительную трубку, через окуляр 10 наблюдается световое поле. Поступательным движением муфты 9 производится фокусировка зрительной трубки. Поворот анализатора осуществляется поворотом маховика 12. Угол поворота анализатора отсчитывается по шкале лимба 10 через лупу 10. Шкала снабжена подвижным нониусом 11. Нуль шкалы соответствует одинаковой яркости всех участков светового поля в отсутствие оптически активного вещества.

Порядок выполнения лабораторной работы 5

1. Включить источник света.
2. Открыть крышку камеры 2 сахариметра и убедитесь, что трубка с раствором сахара вынута.

3. Вращением ручки 12 установить анализатор на темноту с одинаковым затемнением обеих половинок поля зрения, смотря в окуляр 10.

4. В окуляре прибора 10 наблюдать шкалу с нониусом (при правильной установке φ должно быть равно 0).

5. Определить постоянную прибора следующим образом: поместить трубку с раствором сахара известной концентрации C_0 и известной длины L_0 (длину трубки принято выражать в дециметрах, измерьте самостоятельно) в камеру сахариметра, закрыть крышку и, вращая ручку 12, добиться того, чтобы обе половины поля зрения поляриметра были одинаково затемнены, как это было при начальной установке прибора.

6. По шкале окуляра 10 отсчитать угол поворота плоскости поляризации φ_0 .

7. Подставляя найденное значение φ_0 , известные значения C_0 и L_0 в формулу (5.1), вычислить постоянную прибора $[\alpha]$. Измерения угла φ_0 сделайте 5 раз и найти пять соответствующих значений для K . Из пяти значений определите среднее.

8. Взять другую трубку с раствором сахара неизвестной концентрации и, помещая в поляриметр, найие значение угла φ_1 .

9. Подставляя измеренное значение φ_1 , вычисленное среднее значение $[\alpha]$ и измеренное значение L_1 в формулу (5.1), определить концентрацию C_1 .

Контрольные вопросы к лабораторной работе 5

1. Какие существуют способы получения плоскополяризованного света?

2. Какие вещества называются оптически активными?

3. Чем полутеневого метод определения угла поворота плоскости поляризации отличается от метода скрещенных поляризатора и анализатора?

4. Что такое двойное лучепреломление?

5. Чем отличается эллиптически поляризованный свет от линейно-поляризованного?

6. Как изготавливается призма Николя и в чем заключается принцип ее работы?

7. Какие материалы применяются для изготовления поляроидов?

8. Какие кристаллы называются положительными, а какие отрицательными?

9. Как устроен используемый в работе сахариметр и на чем основывается его принцип действия?

Рекомендуемая литература: [1], [4], [5], [8], [9], [10], [11].

Лабораторная работа 6

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИИ

Задание 6.1. Изучение дифракции на щели

Приборы и принадлежности: источник света – He-Ne лазер ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$); регулируемая щель; матовый экран; фотодиод, установленный на оптический столик; универсальный вольтметр.

Цель задания: ознакомление с явлениями дифракции Фраунгофера, экспериментальное исследование распределения освещенности при дифракции света на щели.

Краткая теория

Дифракцией называется явление огибания световыми волнами стоящих на их пути преград, соизмеримых с длиной волны. В зависимости от схемы наблюдения дифракционные явления условно разделяются на дифракцию Френеля и дифракцию Фраунгофера.

Дифракция Френеля наблюдается в расходящихся пучках лучей, когда на пути фронта световой волны располагается лишь непрозрачный экран, частично его загораживающий (рис. 6.1).

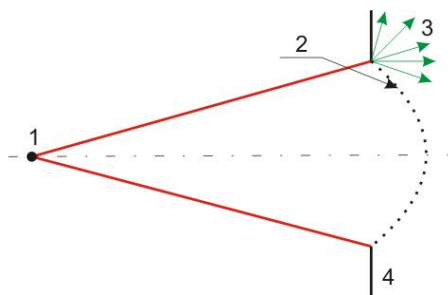


Рис. 6.1. Дифракция Френеля: 1 – источник света; 2 – фронт волны; 3 – дифрагировавшие лучи; 4 – преграда

Дифракция Фраунгофера наблюдается в параллельных лучах, причем рассматривается картина, возникающая в фокальной плоскости линзы, собирающей плоские световые волны, частично загороженные тем или иным непрозрачным экраном (рис. 6.2).

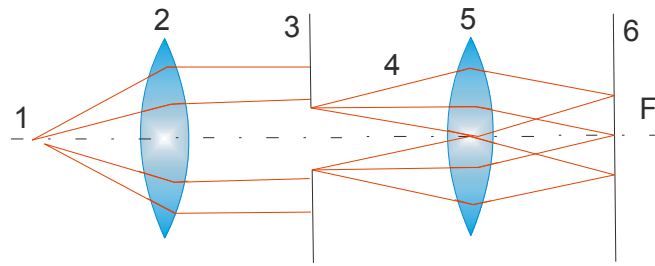


Рис. 6.2. Дифракция Фраунгофера: 1 – источник света; 2 – линза; 3 – щель; 4 – дифрагировавшие лучи; 5 – линза; 6 – фокальная плоскость

Рассмотрим дифракцию Фраунгофера на щели. Пусть монохроматический источник света 1 (рис. 6.3), находящийся в фокальной плоскости линзы 2, освещает щель 3. Выйдя из линзы, параллельный пучок лучей падает на щель 3, расположенную перпендикулярно плоскости рисунка.

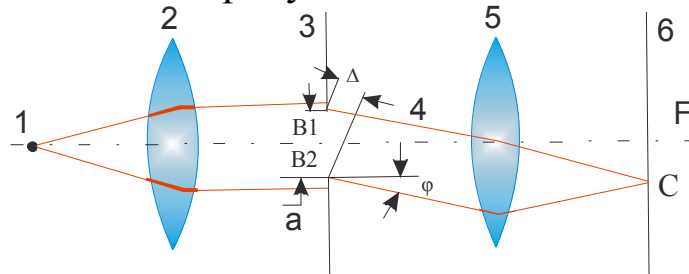


Рис. 6.3. Схема к расчету дифракции на щели: 1 – источник света; 2 – линза; 3 – щель; 4 – дифрагировавшие лучи; 5 – линза; 6 – фокальная плоскость

Каждая точка волнового фронта, достигшего щели, согласно принципу Гюйгенса, является источником вторичных волн, распространяющихся во все стороны. Эти волны называются дифрагировавшими, а углы, образованные соответствующими им лучами с первоначальным направлением, называются углами дифракции. Если ширина щели соизмерима с длиной λ в пределах нескольких порядков, то на экране 6, помещенном в фокальной плоскости линзы 5, наблюдается дифракционная картина, представляющая собой дифракционное изображение щели 3.

Найдем освещенность в точке C (рис. 6.3). В этой точке соберутся лучи, дифрагировавшие под углом φ . Для определения освещенности в точке C необходимо вычислить суммарную амплитуду всех дифрагировавших волн, пришедших в эту точку. Для этого разобьем волновой фронт B_1B_2 на зоны в виде узких полосок одинаковой ширины, параллельных краям щели, и припишем колебаниям, идущим от каждой зоны, амплитуду \vec{a}_i . Так

как световые волны, идущие от каждой зоны до точки C , проходят пути разной длины, то они придут в эту точку с разными фазами. Положим начальную фазу колебаний, приходящих в точку C от крайней нижней зоны (луч B_2C), равной нулю. Тогда начальная фаза колебаний, приходящих в точку C от каждой следующей зоны, будет постепенно увеличиваться до некоторого значения δ . Графически вектор амплитуды \vec{A}_φ суммарного колебания равен $\vec{A}_\varphi = \sum \vec{a}_i$ и изобразится замыкающей ломаной линией, образованной векторами \vec{a}_i .

Если разность хода лучей B_1C и B_2C равна Δ , то, как известно, начальная фаза δ будет связана с разностью хода лучей Δ соотношением

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda},$$

где λ — длина волны падающего света; с другой стороны (рис. 6.3)

$\Delta = b \sin\varphi$, где b — ширина щели. Следовательно,

$$\delta = 2\pi \frac{b \sin\varphi}{\lambda} \quad (6.1)$$

Освещенность в точке C будет различной при различных значениях δ , а следовательно, и углах дифракции φ .

В главном фокусе F линзы $\varphi = 0$. Ему соответствует $\delta=0$, это означает, что все векторы направлены в одну сторону, как показано на графике (рис. 6.4, а). В этом случае амплитуда результирующих колебаний $\vec{A}_{\varphi=\delta=0} = \sum \vec{a}_i = \vec{A}_0$ является максимальной. Таким образом, в центре дифракционной картины получается максимальная освещенность. При $\delta = 2\pi$ ломанная линия, образованная векторами \vec{a}_i , замыкается (рис. 6.4).

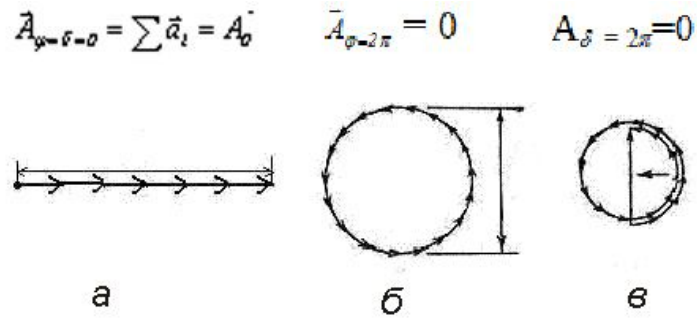


Рис. 6.4. Расчет дифракционной картины методом графического сложения амплитуд: а– $\delta = 0$; б– $\delta = 2\pi$; в– $\delta = 3\pi$

результатирующих колебаний $\bar{A}_{\varphi=\delta=0} = \sum \bar{a}_i = \bar{A}_0$ является максимальной. Таким образом, в центре дифракционной картины получается максимальная освещенность. При $\delta = 2\pi$ ломанная линия, образованная векторами \bar{a}_i , замыкается (рис. 6.4). Этому соответствует минимальное значение освещенности, равное нулю, так как $\bar{A}_{\varphi=2\pi} = 0$. Положение этого минимума определяется по формуле (6.1) значением угла φ , удовлетворяющего условию, $b \sin \varphi = \lambda$ или $\sin \varphi = \lambda/b$.

Очевидно, что такой же минимум расположится по другую сторону от центрального максимума при $\sin \varphi = -\lambda/a$. При этом $\delta = -2\pi$. Результирующая амплитуда \bar{A}_φ окажется равной 0 каждый раз, когда $\delta = 2k\pi$, где k — целое число. Между двумя соседними минимумами расположатся относительные максимумы. Очевидно, \bar{A}_φ будет максимальной каждый раз, когда $\delta = \pm \pi; \pm 3\pi; \dots; \pm(2k+1)\pi$ (рис. 6.4, в, г), а следовательно, при

$$b \sin \varphi = \pm \frac{(2k+1)\lambda}{2}; k = 1, 2, 3, \dots \quad (6.2)$$

Освещенность в этих максимумах, пропорциональная квадрату амплитуды, будет тем меньше, чем больше угол φ .

Окончательно получаем такой вид дифракционной картины от одной щели (рис. 65): в центре ($\varphi = 0$) светлая полоса — максимум освещенности, а по обе стороны расположены вторичные, относительно слабые, максимумы, их относительная освещенность указана на рис. 6.5. Эти максимумы разделены минимумами, освещенность которых равна нулю.

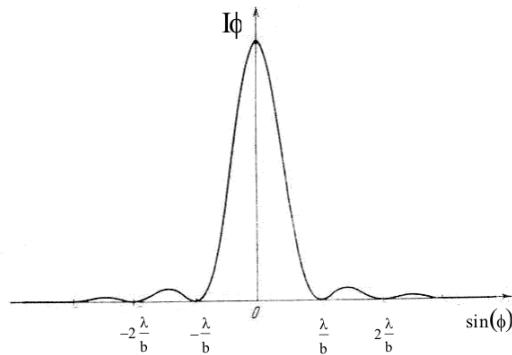


Рис. 6.5. Зависимость относительного распределения освещенности дифракционной картины от $\sin \varphi$ при дифракции на щели шириной b

Положение минимумов определяется условием

$$b \sin \varphi = \pm k \lambda; \quad k = 1, 2, 3 \quad (6.3)$$

Следует заметить, что при смещении щели B_1B_2 параллельно самой себе в той же плоскости дифракционная картина не меняется, положения максимумов и минимумов и относительное распределение освещенности остаются неизменными.

Порядок выполнения работы задания 6.1

Схема экспериментальной установки для выполнения задания изображена на рис. 6.7. Пучок параллельных когерентных лучей, испускаемых лазером 1, падает на щель 2. Регулируя щель микровинтом 3, можно ограничить фронт волны и вырезать лишь узкий плоский участок. В этом случае на экране 4, отстоящем достаточно далеко от щели, будет наблюдаться дифракционная картина. Измерение ширины главного максимума, расположенного в центре дифракционной картины (см. рис. 6.6.), производится при помощи линейки, при различных значениях ширины щели, регулируемой микрометрическим винтом.

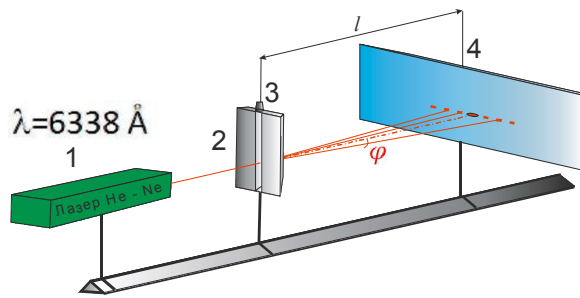


Рис. 6.6. Схема экспериментальной установки для исследования дифракции на щели: 1 – лазер; 2 – щель; 3 – микрометрический винт; 4 – экран;

1. Включить лазер.
2. Собрать схему экспериментальной установки (рис. 6.7)
3. При фиксированном расстоянии между щелью и экраном исследовать зависимость ширины главного дифракционного максимума от ширины щели.
4. Заполнить таблицу экспериментальных значений.

Таблица 6.1

№ п/п	Ширина щели, b , мм	Ширина главного дифракционного максимума, L , мм
1		
...		
5		

5. Построить график зависимости ширины главного дифракционного максимума L (мм) от ширины щели b (мм).

6. Сравнить полученный экспериментальный график с теоретической зависимостью ширины главного максимума от размеров щели в соответствии с формулой (3) и зависимостью $I(\sin\varphi)$, представленной рис. 6.6.

Контрольные вопросы к заданию 6.1

1. В чем заключается принцип Гюйгенса – Френеля?
2. Как формулируются условия когерентности двух волн?
3. Чем отличается дифракция Френеля от дифракции Фраунгофера?
4. Как формулируется условие возникновения максимумов и минимумов при дифракции света на щели?
5. Как влияет ширина щели на дифракционную картину?
6. Как построить векторную диаграмму для определений амплитуды колебаний в случае дифракции от щели?

Задание 6.2. Определение постоянной дифракционной решетки

Приборы и принадлежности: источник света – He–Ne лазер ($\lambda=6328 \text{ \AA}$); дифракционные решетки; экран с миллиметровым масштабом; измерительная линейка.

Цель задания: экспериментальное исследование распределения освещенности при дифракции света на дифракционной решетке, определение постоянной решетки.

Краткая теория

Дифракционной решеткой называется периодическая структура, состоящая из элементов, соизмеримых (в пределах нескольких порядков) с длиной волны. Кристаллы твердых тел представляют собой трехмерную пространственную дифракционную решетку, линейные элементы, расположенные на плоскости, могут образовать плоскую решетку, ряд точек — линейную.

Прозрачные плоские дифракционные решетки изготавливаются в виде пластин из какого-либо прозрачного материала, на который алмазным резцом наносят равно отстоящие друг от друга одинаковые штрихи. Ширина прозрачного промежутка a и непрозрачного b должна быть строго постоянной для каждой решетки. Их сумма $a + b = d$ называется постоянной, или периодом решетки.

Принципиальная схема наблюдения дифракции на прозрачной решетке представлена на рис. 6.8.

Пусть на дифракционную решетку 1 перпендикулярно ее плоскости падает пучок параллельных когерентных лучей. Решетка вызывает дифракцию световых лучей, и в фокальной плоскости 3 линзы 2 образуется сложное дифракционное изображение.

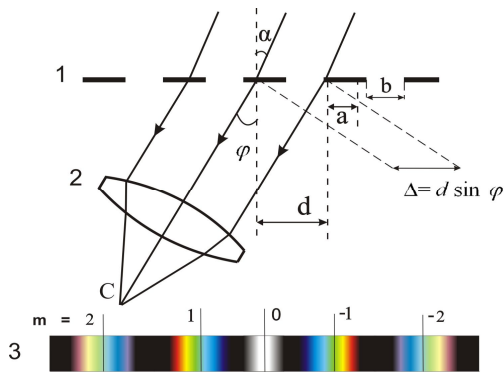


Рис. 6.8. Дифракция на дифракционной решетке

Каждая щель решетки дает дифракционную картину в полном соответствии с картиной, описанной в задании 6.1. При этом дифракционные максимумы и минимумы налагаются друг на друга. Однако теперь явление усложняется тем, что кроме дифракции от каждой щели будет происходить еще интерференция многих пучков, т. е. сложение колебаний, приходящих в данную точку от всех щелей. Если общее число щелей N , то интерферируют между собой N пучков.

Рассмотрим пучок параллельных лучей, дифрагировавших под углом φ . Амплитуды колебаний, пришедших в точку C от всех щелей, будут одинаковы, обозначим через \vec{a}_i . Разность хода Δ между лучами от каждой из двух соседних щелей, как видно из рис.6.7, равна

$$\Delta = (a + b) \sin \varphi = d \sin \varphi. \quad (6.4)$$

Этой разности хода соответствует разность фаз между соседними лучами от каждых двух соседних щелей, равная

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}. \quad (6.5)$$

Суммарную амплитуду можно представить графически вектором замыкающей ломаной линии, образованной векторами амплитуд \vec{a}_i . Очевидно, что вектор \vec{A} достигает максимальной величины во всех случаях, когда векторы \vec{a}_i расположены вдоль одной прямой (рис. 6.4, а). Это имеет место при $\delta = \pm 2k\pi$, где $k = 0, 1, 2, \dots$. При этом длина вектора \vec{A} равна сумме векторов амплитуд от всех щелей $\vec{A} = N\vec{a}_i$. Освещенность прямо

пропорциональна квадрату амплитуды. Следовательно, максимальная освещенность I_{max} будет равна

$$I_{max} = CN^2 a^2, \quad (6.6)$$

где C – коэффициент пропорциональности.

Максимумы, соответствующие условию (6.6), называются главными.

Вектор \vec{A} становится равным 0, когда ломаная линия, образованная векторами \vec{a}_i , превращается в замкнутую линию (рис. 6.4, б), т. е. когда последний вектор \vec{a}_N направлен так же, как \vec{a}_1 , но последний составляет с осью OX угол $N\delta$. Следовательно, вектор \vec{a}_N будет параллелен оси OX при $N\delta = \pm 2k\pi$, где $k = 1, 2, 3 \dots$

Таким образом, получаем условие образования минимумов

$$\delta = \pm \frac{2k\pi}{N}. \quad (6.7)$$

В минимумах освещенность $I_{min} = 0$. Нетрудно видеть, что между максимумами имеется $N-1$ минимум, а следовательно, еще $N-2$ максимума. Эти максимумы очень слабые и называются вторичными максимумами.

Приняв во внимание соотношение (6.4) и (6.5), получим, что главные максимумы возникают при значениях угла φ , удовлетворяющих условию

$$d \sin \varphi = \pm k\lambda; \quad k = 0, 1, 2. \quad (6.8)$$

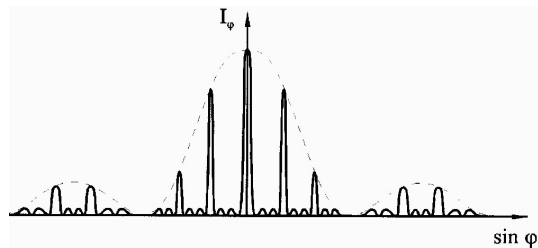


Рис. 6.9. Распределение освещенности при дифракции на дифракционной решетке состоящей из четырех щелей

Целое число k называют порядком спектра, выражение (6.8) – формулой дифракционной решетки. Минимумы возникают при значениях φ , удовлетворяющих условию

$$\sin \varphi = \pm k \frac{\lambda}{dN}, \quad k = 1, 2, 3 \dots, \quad (6.9)$$

кроме $k = N, 2N, 3N \dots$

Учитывая дифракцию от каждой щели и описанную ранее интерференцию от N щелей решетки, освещенность I в фокальной плоскости линзы 3 (рис. 6.8) получим в виде произведения $I = I_1 I_2$, где I_1 – освещенность, обусловленная дифракцией на каждой щели, I_2 – освещенность, обусловленная интерференцией на решетке. На рис. 6.7 представлено истинное распределение освещенности при дифракции от четырех щелей.

Если на дифракционную решетку падает не монохроматический пучок лучей, то условия максимумов (6.7) и минимумов (6.9) будут справедливы для всех длин волн и в фокальной плоскости 3 линзы 2 (рис. 6.7) будет наблюдаться дифракционный спектр в виде смещенных максимумов для всех длин волн источника света.

Как показывает формула (6.8), в центре будет максимум нулевого порядка для всех длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. По обе стороны от этого максимума будут располагаться максимумы 1-го, 2-го и т.д. порядков, соответственно для всех длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots$; при этом, чем короче длина волны, тем ближе расположен соответствующий максимум к центральному. Эта картина будет дифракционным изображением, полученным в результате ограничения светового пучка дифракционной решеткой. Следовательно, дифракционная решетка – прибор, разлагающий белый свет на составные части, с ее помощью получается дифракционный спектр. Формула (6.8) позволяет определить длину волны λ , если известна постоянная решетки d и порядок максимума k .

В более общем случае, когда решетка освещается немонахроматическим (сложным, например, белым) светом, дифракционная картина усложняется (рис. 6.10).

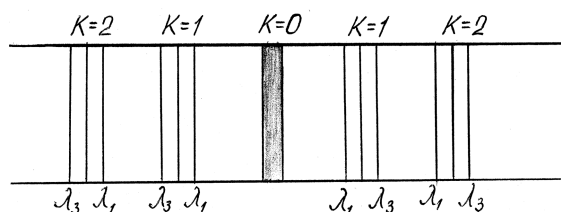


Рис. 6.10. Схематический вид дифракционного спектра

При $k = 0$ условие максимумов, удовлетворяется для всех длин волн, т.е. при $\varphi = 0$ наблюдается центральная световая полоса,

соответствующая неотклоненному пучку лучей такого цвета, каким был цвет источника.

При $k = 1$ симметрично по обе стороны от центральной полосы получаются дифракционные цветовые линии, от фиолетового до красного, соответствующие разным длинам волн, входящим в состав смешанного цвета. Эта группа линий называется спектрами 1-го порядка. Красная часть спектра отклонена больше, чем фиолетовая.

При $k = 2$ получают аналогичные спектры 2-го порядка. Линии спектров высоких порядков менее интенсивны, и на практике ясно наблюдаются спектры не выше 3-го порядка.

Рассмотрим один из методов определения длины волны при помощи дифракционной решетки. Освещая дифракционную решетку 2 (рис. 6.10) с помощью лазера 1 на расположенном за ней экране 3, можно получить четкую дифракционную картину без использования фокусирующей линзы.

Так как в установке используется монохроматическое лазерное излучение, то дифракционная картина будет представлять собой ряд ярких симметрично расположенных пятен (максимумов), интенсивность которых убывает при смещении влево и вправо от центра дифракционной картины.

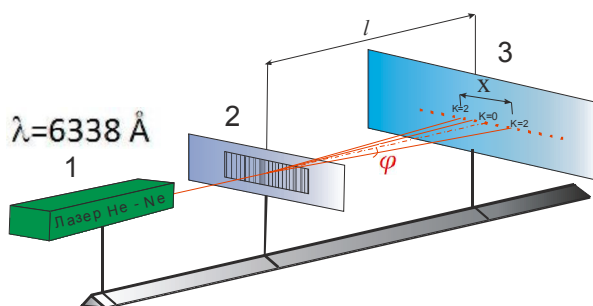


Рис. 6.10. Схема установки для определения постоянной дифракционной решетки: 1 – лазер; 2 – дифракционная решетка; 3 – экран; l – расстояние от решетки до экрана; x – расстояние между центрами максимумов одноименных порядков

Для определения длины волны по формуле (6.8) необходимо знать $\sin \varphi$. Так как $l \gg x$, то

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{2l}.$$

Подставляя значения в выражение (6.8), получим окончательную формулу для нахождения длины волны

$$\lambda = \frac{dx}{k2l}.$$

(6.10)

Длина волны измеряется в микрометрах ($1 \text{ мк} = 10^{-6} \text{ м}$), нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$) или ангстремах ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$).

В данном задании необходимо вычислить постоянную дифракционной решетки, выразив ее из формулы (6.10),

$$d = \frac{\lambda k 2l}{x} \quad (6.11)$$

и рассчитать число штрихов на 1 мм:

$$N = \frac{1}{d}, \quad (6.12)$$

значение N выражается в мм^{-1} . Для измерений используют две дифракционные решетки.

Порядок выполнения работы задания № 6.2

1. Включить He-Ne лазер ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$) в сеть переменного тока. Установить экран на таком расстоянии от дифракционной решетки, чтобы на нем получилось четкое изображение центральной полосы и спектров 1-го и 2-го порядков.

2. Измерить расстояние от экрана до дифракционной решетки.

3. Измерить линейкой на экране расстояние между серединами красных полос спектров 1-го и 2-го порядков.

4. Значения d и N вычислить по формулам (6.11), (6.12).

5. Полученные экспериментальные данные и расчетные значения заносить в табл. 6.2. Оценить погрешности измерений.

6. Для второй дифракционной решетки заполняют аналогичную табл. 6.2.

Таблица 6.2

№ п/п	Расстояние между серединами спектров 1-го порядка x_1 , мм	Расстояние между серединами спектров 2-го порядка x_2 , мм	Расстояние от решетки до экрана l , мм
1-я дифракционная решетка			
1			
2			
...			
Среднее значение постоянной решетки			
Число штрихов на 1 мм			

Контрольные вопросы к заданию 6.2

1. Что представляет собой дифракционная решетка? Каковы параметры, характеризующие дифракционную решетку (постоянная, период, разрешающая способность, угловая и линейная дисперсия)?
2. Как выглядит дифракционная картина при дифракции на решетке? Дать качественное и количественное описание.
3. Какая связь существует между дифракцией и интерференцией?

Рекомендуемая литература: [1], [4], [11], [12], [14].

Лабораторная работа 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Задание 7.1. Определение фокусного расстояния собирающей линзы методом Бесселя

Приборы и принадлежности: экран, линза, осветитель, оптическая скамья и рейтеры, линейка

Цель задания: экспериментальное определение фокусного расстояния собирающей линзы методом Бесселя.

Краткая теория

Линзой называется прозрачное тело (обычно из стекла), ограниченное двумя сферическими поверхностями. Одна из поверхностей линзы может быть плоской (т.е. иметь бесконечно большой радиус кривизны). Линза – простейший частный случай центрированной оптической системы и обладает всеми ее свойствами.

В теории Гаусса описывается идеальная оптическая система, т.е. система, в которой сохраняется гомоцентричность пучков и изображение геометрически подобно предмету. Это есть чисто геометрическая теория, устанавливающая соотношения между точками, линиями и плоскостями в пространстве предметов и пространстве изображений.

Прямая, соединяющая центры сферических поверхностей точки O_1 и O_2 (рис. 7.1), представляет собой ось симметрии центрированной системы и называется ее главной оптической осью. Теория Гаусса устанавливает шесть так называемых кардинальных точек одномерных кардинальных плоскостей, задание которых полностью определяет все свойства оптической системы.

Учитывая, что кардинальные точки не являются линейно независимыми для описания центрированной системы (в том числе и для построения изображений), оказывается достаточным задание четырех из них.

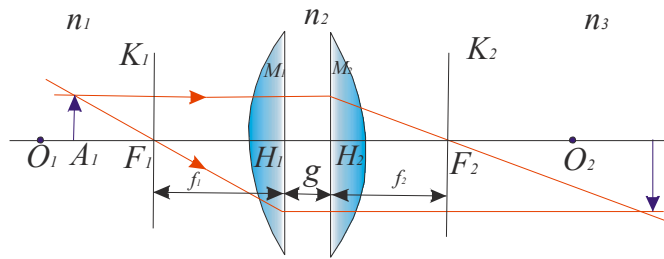


Рис. 7.1. Центрированная оптическая система: F_1, F_2 – передний и задний фокусы; K_1F_1, K_2F_2 – передняя и задняя главные точки системы; M_1H_1, M_2H_2 – передняя и задняя главные плоскости

Точки F_1 и F_2 называются передним и задним фокусом системы, если сопряженные с ними точки находятся в бесконечности.

Следовательно, в фокусах F_1 и F_2 пересекаются лучи, падающие на оптическую систему (соответственно справа и слева) параллельно ее главной оптической оси. Фокусы F_1 и F_2 являются кардинальными точками системы, а проходящие через них перпендикулярно главной оптической плоскости – кардинальными фокальными плоскостями системы.

Две перпендикулярные главной оптической оси плоскости M_1H_1 и M_2H_2 , точки которых сопряжены и изображаются с увеличением, равным $+1$ (т. е. плоскость M_1H_2 изображается на M_2H_2 прямо, в натуральную величину), называются главными плоскостями системы, а точки пересечения этих плоскостей с главной оптической осью – главными точками. Главные плоскости и главные точки – также кардинальные элементы системы.

Передним фокусным расстоянием системы называется расстояние $F_1 = F_1H_1$, т. е. расстояние от переднего фокуса до передней главной точки, аналогично задним фокусом называется расстояние $F_2 = H_2F_2$.

Можно показать, что если показатели преломления пространства предметов n_1 и пространства изображений n_3 равны ($n_1 = n_3$), то переднее и заднее фокусные расстояния системы также равны ($F_1 = F_2$).

На рис. 7.1 дан возможный вариант построения изображения A_2B_2 предмета A_1B_1 с учетом свойств, рассмотренных кардинальных элементов системы.

В зависимости от вида ограничивающих поверхностей линзы бывают двояковыпуклыми, плосковыпуклыми, двояковогнутыми, плосковогнутыми и вогнуто-выпуклыми. На рис. 7.2 изображены

различные типы линз и их главные плоскости.

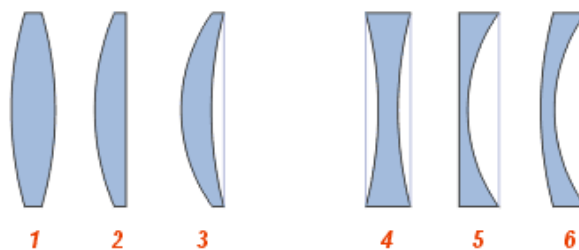


Рис. 7.2. Типичные линзы с указанием их главных плоскостей:
 собирающие: 1 — двояковыпуклая, 2 — плоско выпуклая, 3 — вогнуто-выпуклая (положительный (выпуклый) мениск);
 рассеивающие: 4 — двояковогнутая, 5 — плоско вогнутая, 6 — выпукло-вогнутая (отрицательный (вогнутый) мениск);

Как видно из рис. 7.2, главные плоскости (главные точки) могут лежать как внутри, так и вне линзы совершенно несимметрично относительно ее поверхностей.

Если толщина линзы достаточно мала по сравнению с радиусами кривизны ограничивающих ее поверхностей и можно считать, что передняя и задняя главные плоскости, передняя и задняя поверхности пересекают главную оптическую ось в одной общей точке, то линзу называют тонкой, а точку пересечения слившихся плоскостей с главной оптической осью — оптическим центром линзы. В этом случае переднее и заднее фокусные расстояния линзы отсчитываются от ее оптического центра.

Рассмотрим тонкую собирающую линзу (рис. 7.3). Будем предполагать, что $n_1 = n_3 = 1$; $n_2 = n$; $F_1 = F_2 = F$.

Конкретизируем сформулированные ранее свойства оптической системы применительно к этому частному случаю.

На рис. 7.3 оптический центр — это точка O , проходя через которую лучи не изменяют направления.

Всякая прямая, проходящая через оптический центр, называется оптической осью, и если она, кроме того, проходит через центры кривизны (O_1 и O_2) — главной оптической осью.

Плоскость, перпендикулярная главной оптической оси и проходящая через оптический центр, называется главной плоскостью линзы.

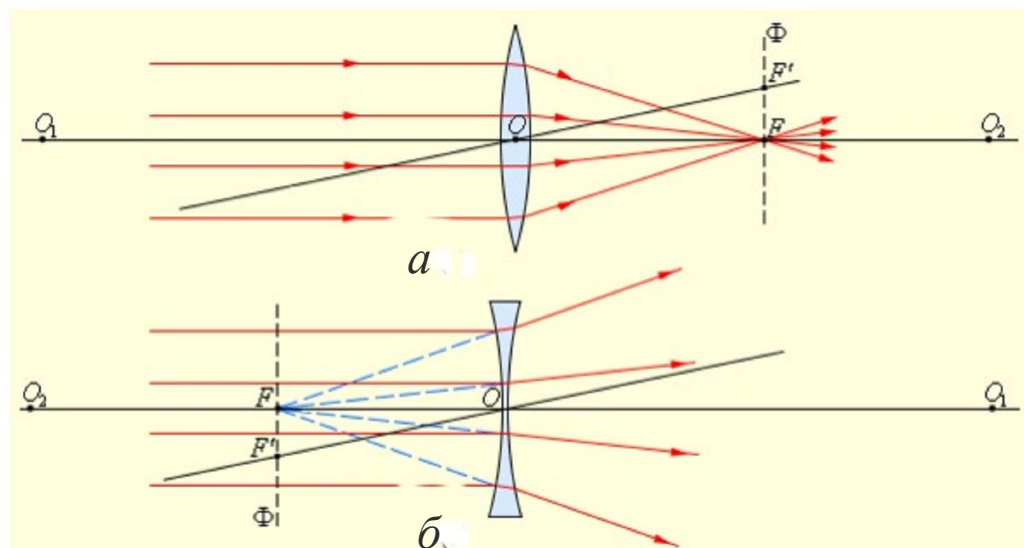


Рис. 7.3. Преломление параллельного пучка лучей: а – в собирающей; б – рассеивающей линзах. Точки O_1 и O_2 – центры сферических поверхностей; O_1O_2 – главная оптическая ось, O – оптический центр, F – главный фокус; F' – побочный фокус, OF' – побочная оптическая ось; Φ – фокальная плоскость

Главным фокусом линзы называется точка, в которой пересекаются после преломления в линзе лучи, падающие на нее пучком, параллельным главной оптической оси (на рис. 7.3 точки F). Расстояние главного фокуса от оптического центра линзы (расстояние OF_1 и OF_2) называется главным фокусным расстоянием и является основной характеристикой линзы. Для собирающих линз главное фокусное расстояние – величина положительная, для рассеивающих – отрицательная. Часто линзу характеризуют оптической силой $D = 1/F$ – величиной, обратной главному фокусному расстоянию, выраженному в метрах (если линза находится в среде с показателем преломления, отличным от 1, оптическая сила линзы $D = n / F$, где n – показатель преломления среды). Для рассеивающих линз главный фокус мнимый, для его отыскания берут не сами лучи, а их продолжение (рис. 7.1).

Для построения изображения предмета с помощью линзы пользуются лучами, ход которых через линзу известен. Обычно берут два луча из следующих трёх: 1 – проходит через оптический центр (идёт через линзу не преломляясь); 2 – падает на линзу параллельно её главной оптической оси (при выходе из линзы пройдет через её главный фокус); 3 – проходит через главный фокус линзы (он из линзы выйдет параллельно её главной оптической оси) (рис. 7.4).

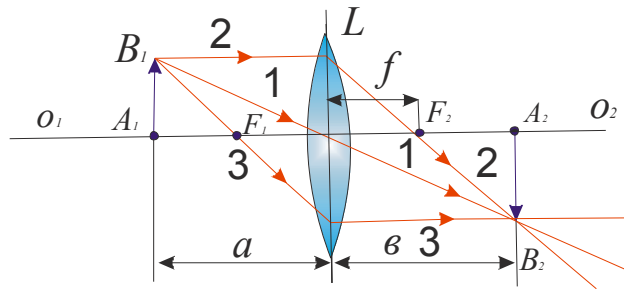


Рис. 7.4. Лучи, используемые для построения изображений в линзах

Изображение предмета AB в зависимости от того, на каком расстоянии от линзы он будет находиться, может получиться увеличенным или уменьшенным, действительным (как на рисунке) или мнимым.

Делая построение изображения, мы ограничились лучами, образующими малые углы с оптической осью линзы (параксиальные лучи). Обозначим через a (рис. 7.4) расстояние от предмета до линзы, а через b – расстояние от линзы до изображения. Зависимость между a , b и F (фокусным расстоянием) даёт нам формулу тонкой линзы

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F}. \quad (7.1)$$

Линейное увеличение, даваемое тонкой линзой, равно

$$K = \frac{A_2 B_2}{A_1 B_1} = \frac{b}{a}, \quad (7.2)$$

т. е. линейным увеличением называется отношение размера изображения предмета к соответствующему размеру предмета.

Оптическая сила тонкой линзы может быть рассчитана по формуле

$$D = \frac{1}{F} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (7.3)$$

где F – фокусное расстояние линзы; R_1 и R_2 – радиусы кривизны первой и второй преломляющих поверхностей линзы, считаемые по ходу луча света; n – показатель преломления материала линзы. Радиусы выпуклых поверхностей считаются положительными, вогнутых – отрицательными.

При определении фокусного расстояния собирающей линзы обычно применяют формулу тонкой линзы. Однако положение оптического центра линзы не всегда известно, поэтому расстояние f находят не непосредственно, а используя метод перемещения

линзы – метод Бесселя.

Определение фокусного расстояния собирающей линзы по методу ее перемещения сводится к следующему.

Если расстояние от предмета до изображения больше $4f$, то всегда найдутся два таких положения линзы, при которых на экране получается отчетливое изображение предмета: в одном случае увеличенное, в другом – уменьшенное (рис. 7.5).

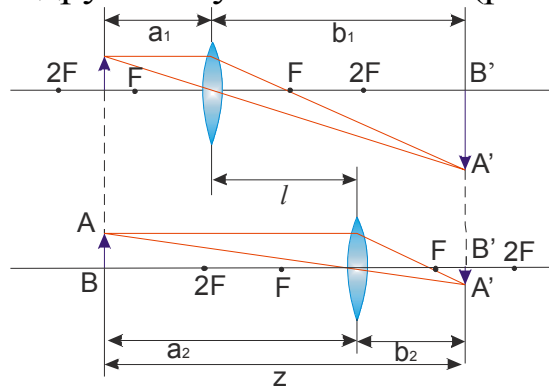


Рис. 7.5. Схема измерения фокусного расстояния линзы по методу Бесселя

Для одного положения линзы расстояние от предмета до линзы и от линзы до изображения обозначим через a_1 и b_1 , а для другого – a_2 и b_2 . Так как расстояние между экраном и предметом остаётся неизменным, то

$$a_1 + b_1 = a_2 + b_2.$$

Из этого равенства и равенства $1/F = (a+b)/(ab)$, которое представляет собой преобразованную формулу тонкой линзы, заключаем, что совместное существование указанных формул возможно только в том случае, когда $a_1 = b_2$ и $a_2 = b_1$. Обозначив расстояние между обоими положениями линзы через l , получим

$$a_1 = b_2 = \frac{z-l}{2}; \quad a_2 = b_1 = \frac{z+l}{2}.$$

Подставляя эти значения в формулу линзы и решая относительно главного фокусного расстояния, получим

$$F = \frac{(z+l)(z-l)}{4z} = \frac{z^2 - l^2}{4z};$$

$$F = \frac{z^2 - l^2}{4z} \quad (7.4)$$

Формула (7.4) носит название формулы Бесселя.

Если рассматривать реальную толстую линзу, то главные ее плоскости не будут совпадать, образуя оптический центр линзы. Метод Бесселя применим и в этом случае. Формула для вычисления фокусного расстояния, помимо введенных ранее величин z и l , будет содержать величину g – расстояние между главными плоскостями линзы (см. рис. 7.1)

$$F = \frac{(z - g)^2 - l^2}{4(z - g)}. \quad (7.5)$$

Для расчета фокусного расстояния F по формуле (7.5) необходимо знать величину g . Для ее определения можно повторить опыт, взяв другое расстояние z_1 между предметом (спиралью лампы) и экраном:

$$F = \frac{(z_1 - g)^2 - l_1^2}{4(z_1 - g)}. \quad (7.6)$$

Решая совместно уравнения (7.5) и (7.6), можно определить F и g .

Для упрощения расчета в последних формулах можно пренебречь g^2 по сравнению с z^2 , тогда для расчета фокусного расстояния линзы получим выражение

$$F = \frac{z^2 - l^2}{4z} - \frac{z^2 + l^2}{4z^2} g. \quad (7.7)$$

Порядок выполнения задания 7.1

1. Расположить приборы на оптической скамье, как показано на рис. 7.6.

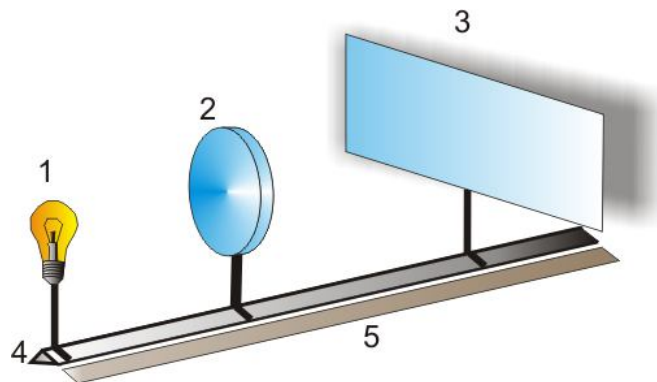


Рис. 7.6. Схема экспериментальной установки: 1 – экран; 2 – линза; 3 – предмет (спираль лампы); 4 – оптическая скамья; 5 – оптическая скамья

скамья; 5 – линейка

2. Передвигая линзу, добиться получения на экране отчётливого изображения предмета – спирали лампы, например, увеличенного. Отмечать на оптической скамье положение линзы l_1 . Не изменяя положения экрана и осветителя, перемещая только линзу, получить на экране уменьшенное изображение спирали. Вновь отметить положение линзы на скамье l_2 . Положение линзы удобно отмечать, засекая, например, положение переднего края рейтера, на котором установлена линза.

3. Определить расстояние l между двумя положениями линзы, $l = |l_2 - l_1|$.

4. Измерить расстояние z между предметом и экраном.

5. Опыт повторить несколько раз, изменяя расстояние между предметом и экраном. Проводить расчет фокусного расстояния по формуле (7.4).

6. Используя данные измерений любых двух опытов, проводить расчет фокусного расстояния F и расстояния между главными плоскостями g по формулам (7.5)–(7.7). Данные занести в табл.7.1.

Таблица 7.1

Номер опыта	Расстояние между предметом и экраном $z, м$	Перемещение линзы	Фокусное расстояние			
			$l_{n,m}$	Приближение тонкой линзы		Приближение толстой линзы
		$F_n, м$		$F_{cp}, м$	$F, м$	$g, м$
1						
...						
5						

7. Оценить случайные и систематические погрешности измерений.

Линза, используемая в лабораторной работе, состоит из двух плосковыпуклых одинаковых линз, сложенных вместе плоскими сторонами и укрепленных в одной оправе.

Задание 7.2. Определение показателя преломления плосковыпуклой линзы по фокусному расстоянию и кривизне поверхности

Приборы и принадлежности: плосковыпуклая линза, оптический сферометр ИЗС-7.

Цель задания: определение показателя преломления плосковыпуклой линзы по фокусному расстоянию и кривизне поверхности.

Краткая теория

Оптическая сила линзы связана с показателем преломления n вещества линзы и радиусами кривизны поверхностей R_1 и R_2 формулой (7.3).

Зная F , R_1 , R_2 , можно из (7.3) определить показатель преломления n

$$n = \frac{R_1 R_2}{F (R_1 + R_2)} + 1. \quad (7.8)$$

В задании № 1 использовалась оптическая система из плотно сложенных одинаковых линз ($R_1 = R_2 = R$) в одной оправе, поэтому

$$n = \frac{R}{2F} + 1, \quad (7.9)$$

где R – радиус кривизны плосковыпуклой линзы.

Радиусы кривизны поверхности измеряются с помощью оптического сферометра, имеющего следующую конструкцию. Внутри корпуса расположен измерительный стержень с миллиметровой шкалой, который под действием груза поднимается вверх и тем самым обеспечивает контакт сферического наконечника с измеряемым изделием. В верхней части корпуса есть специальная площадка, на которую помещают измерительные кольца с укрепленными на них тремя шариками. К сферометру прилагается набор измерительных колец. Значение радиуса кольца и радиус шарика приведены в аттестате прибора.

Отсчет по миллиметровой шкале производят с помощью измерительного микроскопа со спиральным микрометром.

Методика работы на сферометре

Внутри литого металлического корпуса прибора 12 (рисунок 7) находится измерительный стержень 4 со стеклянной миллиметровой шкалой длиной 30 мм. Под действием противовеса стержень поднимается вверх и своим сферическим наконечником 3 соприкасается с поверхностью контролируемой детали 7. Для опускания измерительного стержня вниз служит арретир 3. Отсчет по шкале производится при помощи микроскопа со спиральным окуляр-микрометром 10 с ценой деления 0,001 мм. Шкала освещается лампочкой с рабочим напряжением 3,5 В, помещенной в патрон 2 и включаемой в сеть через трансформатор. Сферометр снабжен сменным кольцом 8 с диаметром 85 мм, опорами в котором являются три шарика радиусом r .

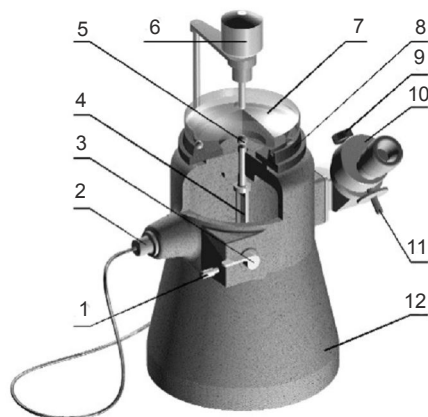


Рис.7.7. Устройство кольцевого сферометра ИЗС-7

Определение радиуса кривизны выпуклой поверхности сводится к измерению на сферометре высоты h шарового сегмента (рис. 7.8).

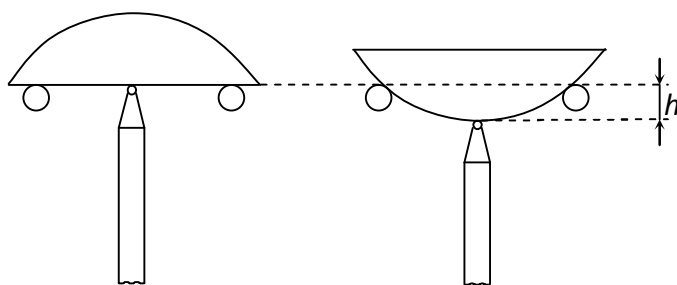


Рис. 7.8. Измерение высоты шарового сегмента

Измерение стрелки производится следующим образом. С помощью рычага арретира измерительный стержень отводят вниз и на установленное на сферометре кольцо с тремя шариками осторожно накладывают плоскую поверхность линзы. Рычаг отпускают, и измерительный стержень, плавно поднимаясь, приходит в соприкосновение с плоской поверхностью линзы. Затем с помощью встроенного измерительного микроскопа со спиральным микрометром несколько раз (не менее 5) вычисляют среднее значение из полученных результатов. Далее на кольцо осторожно кладут линзу выпуклой поверхностью и аналогично проводят не менее 5 измерений, после чего вычисляют среднее значение из полученных результатов. Разность двух средних отсчетов по шкале дает высоту h сегмента измеряемой сферической поверхности. Отсчет положения измерительного стержня с помощью спирального микрометра осуществляется следующим образом.

В поле зрения микроскопа одновременно видны: два–три штриха миллиметровой шкалы, обозначенные крупными цифрами, предположим это «11», «12», «13» (рис. 7.9), неподвижная шкала десятых долей миллиметра с делениями от «0» до «10», круговая шкала для отсчета сотых и тысячных долей и десять витков двойных спиралей. Чтобы произвести отсчет, необходимо предварительно маховичком подвести двойной виток спирали так, чтобы миллиметровый штрих, находящийся в зоне двойных витков, оказался точно посередине между линиями витка. Индексом для отсчета миллиметров служит нулевой штрих шкалы десятых долей миллиметра.

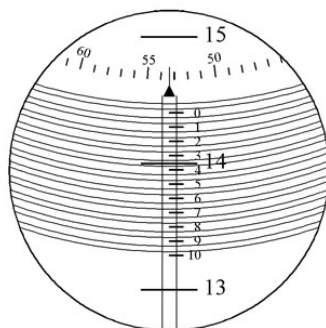


Рис. 7.9. Поле зрения окулярного микрометра сферометра ИЗС–7

На рис. 7.9 миллиметровый штрих «14» прошел нулевой штрих десятых долей миллиметра, а ближайший штрих «15» еще не дошел до нулевого штриха шкалы десятых долей миллиметра. Очевидно, отсчет будет 12 мм плюс отрезок от штриха «13» до нулевого штриха десятых долей миллиметра. В этом отрезке число десятых долей миллиметра будет обозначено цифрой 2 последнего уже пройденного штриха шкалы десятых долей миллиметра. Сотые и тысячные доли миллиметра отсчитываются по другой шкале, указателем для отсчета по ней служит стрелка, цена деления круговой шкалы 0,001 мм. На рис. 7.8 стрелка прошла некоторую часть интервала шкалы. Эту часть определяют на глаз, она примерно равна 0,8 деления круговой шкалы. Итак, окончательный отсчет будет 12,2728 мм.

Подробно ознакомиться с устройством оптического сферометра можно по заводской инструкции, приложенной к нему.

Порядок выполнения задания 7.2

1. Ознакомиться с оптическим сферометром. Найти величину h .
2. Определить радиус кривизны линзы R по формуле $R = r^2/(2h) + h/2 - \rho$, где r – радиус кольца с опорными шариками ($r = 49$ мм), ρ – радиус шарика ($\rho = 5$ мм); h – измеренная стрелка.
3. Вычислить показатель преломления линзы n по формуле (7.9).
4. Оценить погрешность измерений.
5. Результаты измерений и вычислений занести в табл.7.2.

Таблица 7. 2

Номер опыта	Отсчет по шкале микрометра для плоской и выпуклой поверхности		Измеренная стрелка		Радиус линзы R , мм	Показатель преломления $n_{cp} \pm \Delta n$
			h_i , мм	h_{cp} , мм		
	a_i , мм	b_i , мм				
1						
2						
...						
5						

Замечание: a_i ; b_i – положения стрелки сферометра.

Контрольные вопросы к лабораторной работе 7

1. Что называется линзой? Какие типы линз Вы знаете?
2. Что называется радиусом кривизны линзы?
3. Какая линза называется толстой?
4. Что называется кардинальными элементами центрированной оптической системы?
5. Какая линза называется тонкой?
6. Как влияет показатель преломления вещества линзы на ее фокусное расстояние?
7. Что называется главной оптической осью линзы, побочной оптической осью линзы, главным фокусом, фокальной поверхностью?
8. Какой пучок света называется параксиальным?
9. Как записывается формула тонкой линзы?
10. Какой физический смысл имеет оптическая сила линзы?
11. Как выводится формула Бесселя?
12. Как строится изображение предмета в линзе, если предмет находится:
 - а) за двойным фокусом;
 - б) между фокусом и двойным фокусом;
 - в) между фокусом и линзой?

Рекомендуемая литература: [6], [10], [12], [13], [14].

Лабораторная работа 8

СПЕКТРОФОТОМЕТРЫ ФМ-56, ФОУ. ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕКОЛ

Задание 8.1. Измерение спектров пропускания при помощи универсального фотометра ФМ-56

Приборы и принадлежности: универсальный фотометр ФМ-56, микрометр, набор исследуемых светофильтров (цветные стекла).

Цель задания: снятие спектров пропускания светофильтров.

Краткая теория

Окраска различных предметов, освещенных одним и тем же источником света (например, солнцем), бывает весьма разнообразна, несмотря на то, что все эти предметы освещены светом одного состава. Основную роль в таких эффектах играют явления пропускания и отражения света. Световой поток, падающий на тело, частично отражается (рассеивается), частично пропускается и частично поглощается телом.

Доля светового потока, участвующего в каждом из этих процессов, определяется с помощью соответствующих энергетических коэффициентов: отражения R , пропускания T и поглощения K .

Каждый из указанных коэффициентов может зависеть от длины волны, благодаря чему и получаются разнообразные эффекты при освещении тел. Тело, у которого, например, для красных лучей T (пропускание) велико, а R (отражение) мало, а для зеленых лучей, наоборот, T – мало, а R – значительно; будет казаться красным в проходящем свете и зеленым – в отраженном.

Отражение светового потока оценивается коэффициентом отражения R , показывающим отношение отраженного потока Φ_{om} к падающему Φ_{no} , т.е.

$$R = \frac{\Phi_{om}}{\Phi_{no}} \quad (8.1)$$

Поглощение характеризуется коэффициентом поглощения K , равным отношению светового потока $\Phi_{\text{пог}}$, поглощенного телом, к световому потоку $\Phi_{\text{пад}}$, падающему на тело

$$K = \frac{\Phi_{\text{пог}}}{\Phi_{\text{пад}}} \quad (8.2)$$

Пропускание света телами характеризуется коэффициентом пропускания T , который равен отношению прошедшего сквозь тела светового потока $\Phi_{\text{прош}}$ к падающему, т.е.

$$T = \frac{\Phi_{\text{прош}}}{\Phi_{\text{пад}}} \quad (8.3)$$

Часто вместо коэффициента пропускания T вводят величину D – оптическую плотность ($D = \lg(1/T)$), что очень удобно при использовании фотометрических приборов. Если, например, оптическая плотность равна 1, то это соответствует 10 % пропускания света, если 2, то 1 % пропускания.

По закону сохранения энергии

$$\Phi_{\text{пад}} = \Phi_{\text{от}} + \Phi_{\text{пог}} + \Phi_{\text{прош}}$$

На основании формул (8.1), (8.2) и (8.3) имеем

$$K + R + T = 1, \quad (8.4)$$

т.е. сумма коэффициентов поглощения, отражения и пропускания равна единице.

Если свет падает параллельным пучком нормально к поглощающему веществу и коэффициентом отражения можно пренебречь ($R=0$), то зависимость между плотностью потока световой энергии (интенсивностью) I_0 падающего света и прошедшего I выражается законом Бугера

$$I = I_0 e^{-\alpha d}, \quad (5)$$

где I_0 – плотность потока энергии падающего светового потока на 1 см^2 ; d – толщина поглощающего слоя; I – плотность потока энергии, прошедшего слой толщиной d ; α – показатель поглощения.

Формула (8.5) справедлива только для монохроматического света, так как α для каждого вещества зависит от длины волны.

При измерении показателя поглощения α необходимо вносить соответствующие поправки, учитывая, что часть света отражается от границы исследуемого вещества.

В нашей работе отражение незначительно, и мы потери на отражение учитывать не будем.

Прологарифмировав формулу (8.5) и решив уравнение относительно α , получим формулу для вычисления показателя поглощения:

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \frac{I}{I_0} = -\frac{2,3}{d} \lg \frac{I}{I_0} = \frac{2,3}{d} \lg \frac{1}{T} = \frac{2,3}{d} D, \quad (8.6)$$

где D – оптическая плотность данной среды; T – коэффициент пропускания.

Для различных веществ численное значение показателя поглощения α различно и колеблется в широких пределах.

В данном задании измерения пропускания T (или оптической плотности D) света цветными стеклами выполняется с помощью универсального фотометра ФМ-56.

Описание фотометра ФМ-56

Фотометр (рис. 8.1) состоит из следующих основных узлов: фотометрической головки 13, в которой находятся оптические детали; револьверного диска 14 с одиннадцатью светофильтрами 14, номера которых появляются в окошечке диска; штатива 5; предметного столика 10, который может перемещаться при помощи кремальеры 9, плоского зеркала 7 и осветителя 2 с двумя конденсорами.

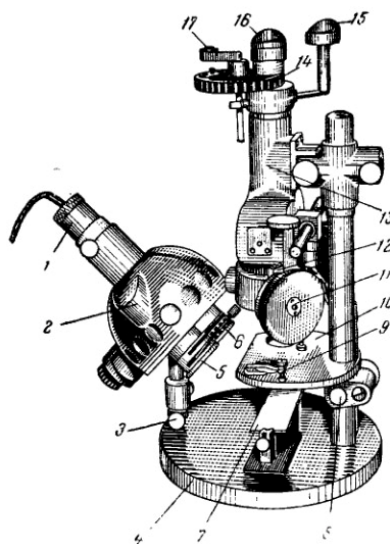


Рис. 8.1. Общий вид фотометра ФМ-56

Все эти детали смонтированы на массивном круглом основании 10.

В основу устройства прибора положен принцип уравнивания двух световых потоков путем изменения одного из них с помощью диафрагмы с переменным отверстием.

Два параллельных световых пучка A' и B' (рис. 8.2), выходящие из осветителя 2 (рис. 8.1), отразившись от зеркала 7, попадают в прибор через две диафрагмы 6', степень раскрытия которых регулируется поворотом барабана 6. Далее световые пучки A' и B' объединяются с помощью объективов 13 и ромбических призм 14 и попадают на бипризму 15, которая сводит два пучка к оси окуляра, причем часть правого пучка, попадая на левую половину бипризмы, создает яркость левой половины поля зрения, а другая часть его, попадающая на правую половину бипризмы, отклоняется в сторону и поглощается внутри прибора. Левый пучок проходит симметрично.

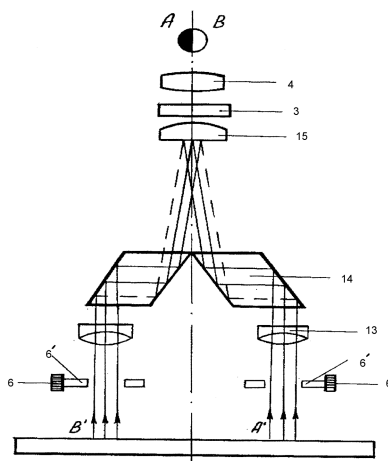


Рис. 8.2. Оптическая схема фотометра ФМ-56

Из бипризмы лучи проходят через один из одиннадцати светофильтров 3, помещенных в револьверном диске 2 (рис. 8.1), и попадают в окуляр 4, а из окуляра через наглазник 5 в глаз наблюдателя. Окуляр 4, служащий для наблюдения поля зрения, имеет кольцо, с помощью которого производится установка на резкость линии раздела поля зрения.

Наблюдатель видит поле зрения в форме круга, разделенного линией на две половины A и B , имеющие в общем случае различную яркость. Яркость правой части поля определяется световым потоком, проходящим через левую диафрагму, а левой – через правую.

Если обе диафрагмы 7' одинаково освещены и в одинаковой мере раскрыты, то яркость обеих половин поля зрения будет

одинакова. Если при равенстве яркостей обеих половин поля зрения на пути одного светового потока, например A , поместить пластину из какого-либо вещества, поглощающего или отражающего свет, то фотометрическое равенство нарушится, так как поле A' станет менее ярким. Чтобы уравнять поля, необходимо уменьшить яркость поля B , что осуществляется изменением отверстия диафрагмы, через которую проходит световой поток B' .

На измерительных барабанах b' нанесены две шкалы – черная и красная. Черная шкала показывает в процентах отношение площади отверстия диафрагмы S при данном ее раскрытии к площади S_0 при ее максимальном раскрытии. Так как световой поток равномерного пучка света, проходящего через диафрагму, пропорционален площади ее раскрытия, то отношение площадей отверстий диафрагм дает отношение световых потоков A' и B' . Следовательно, показания черной шкалы барабана дают непосредственно коэффициент пропускания T для данного образца в процентах, т.е. отношение светового потока, прошедшего через данный образец, к световому потоку, падающему на него.

Красная шкала на барабане b' соответствует оптической плотности D образца. Для удобства шкалы барабанов освещаются осветителем и снабжены лупами.

Порядок выполнения задания 8.1

1. Привести фотометр в рабочее положение, для чего:

а) включить через понижающий трансформатор 220/8 В лампу осветителя;

б) осветитель устанавливать так, чтобы световые пучки, направляемые зеркалом снизу, давали бы одинаковую освещенность отверстий фотометра (при этом оба барабана должны стоять на отметках 100, что по черной шкале соответствует полному одинаковому раскрытию диафрагм);

в) ввести зеленый светофильтр под номером 4, поворачивая револьверный диск 2, который расположен в верхней части прибора и затем сфокусировать окуляр 4 (с помощью кольца) на линию раздела полей сравнения и наблюдать изображения спирали лампы осветителя, видимые в каждой половине поля зрения. Если изображения не резки, то слегка передвинуть конденсоры осветителя.

Для создания равномерно светящегося фона наблюдений в пазы оправ конденсоров вставить матовые рассеиватели.

2. Левый барабан установить на деление 100 (по черной шкале) и больше не трогать.

3. Исследуемый образец поместить на предметный столик под левой диафрагмой, при этом правая половина поля зрения темнеет. Вращая правый измерительный барабан, добиться равенства яркостей обеих половин зрения и брать отсчет T прямо по черной шкале правого барабана. Установку правого барабана на равенство яркостей произвести 3–5 раз и из полученных отсчетов взять среднее арифметическое.

4. Измерить коэффициент пропускания трех прозрачных цветных образцов (из синего, красного, зеленого стекла или плексигласа) для различных длин волн. Для этого каждый из исследуемых образцов поместить на столик под левой диафрагмой, включить последовательно светофильтры от № 1 до № 11, поворачивая диск 2 (рис. 8.1), и для каждого светофильтра сделать отсчеты пропускания T образца (по черной шкале).

5. По формуле (8.6) (без учета потерь на отражение) для трех образцов рассчитать спектральную зависимость показателя поглощения $\alpha = \alpha(\lambda)$. (Толщины образцов измеряют микрометром.)

6. Результаты измерений занести в табл. 8.1.

Примечание: 1) фильтр пропускает излучение определенной эффективной длины волны ($\lambda_{эф}$); 2) область пропускания фильтров от № 1 до № 8 сравнительно узка, эти одиннадцать фильтров делят видимую область спектра примерно на равные участки шириной в 40 нм каждый.

Три светофильтра № 9, 10, 11 обладают более широкой областью пропускания, они делят видимую область спектра на три части: красную, зеленую и синюю.

7. Построить график зависимости коэффициента пропускания от длины волны $T=T(\lambda)$ для синего, красного и зеленого образцов. По оси абсцисс отложить длину волны λ , а по оси ординат – найденное значение $T(\%)$. Длины волны света, пропускаемые каждым светофильтром, указать в таблице записи результатов.

8. Измерить значения коэффициентов пропускания T для синих светофильтров различной толщины (d , $2d$ и $3d$) при фиксированной длине волны λ_1 , последовательно накладывая их друг на друга. Проверить графически выполнение закона Бугера. Из формулы

(8.5) следует, что $\ln(1/T) = \alpha d$, таким образом, при $\alpha(\lambda) = \text{const}$ $\ln(1/T)$ зависит от d линейно (в чем и нужно убедиться графически).

Таблица 8.1

Номер фильтра	Маркировка фильтра	$\lambda_{эф}$, нм	Коэффициент пропускания T , %; показатель поглощения α , см ⁻¹					
			Образцы					
			красный		синий		зеленый	
			T_k	α_k	T_c	α_c	T_z	α_z
1	М-72	726						
2	М-66	665						
3	М-61	619						
4	М-57	574						
5	М-53	533						
6	М-50	496						
7	М-47	465						
8	М-43	432						
9	К-2	633						
10	К-4	550						
11	К-6	478						

Контрольные вопросы к лабораторной работе 8

1. Как устроены фотометры ФМ-56 и ФОУ: оптические схемы, способ сравнения световых потоков?

2. Что такое коэффициент отражения, поглощения, пропускания?

3. Что называется показателем поглощения, оптической плотностью? Как они связаны?

4. Как формулируется закон Бугера? Как учесть в законе Бугера потери на отражение?

5. Как можно объяснить часто наблюдаемое различие окраски тел в отраженном и проходящем свете?

6. Как рассчитать коэффициенты отражения R и пропускания T света от плоскопараллельной прозрачной пластинки толщиной d , если коэффициент отражения от этой поверхности равен r , поглощение пренебрежимо мало, угол падения света на пластинку близок к нулю?

Рекомендуемая литература: [5], [10], [11], [14].

Рекомендуемая литература

1. Ахматов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. М., 1998.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М., 2008.
3. Иродов И.Е. Волновые процессы. М., 2002.
4. Князев С.И. Физический практикум по оптике: в 4 ч. Шадринск, 1970. Ч. 4.
5. Кортнев А.В., Рублев Ю.В., Куценко А.Н. Практикум по физике. М., 1965.
6. Лабораторные занятия по физике / под ред. Л.Л. Гольдина. М., 1983.
7. Лабораторный практикум по общей физике / под ред. Е.М. Гершензона, Н.Н. Малова. М., 1985.
8. Лабораторный практикум по физике / Под ред. А.С. Ахманова. М., 1980.
9. Ландсбегр Г.С. Оптика. М., 1976.
10. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. М., 1963.
11. Матвеев А.Н. Оптика. М., 1985.
12. Савельев И.В. Курс общей физики: в 3 т. М., 2001. Т. 2.
13. Сивухин Д.В. Общей курс физики: в 4 т. М., 2002. Т. 4.
14. Физический практикум: в 2 т. / под ред. В.И. Ивероновой М., 1968. Т. 2.
15. Богатов Н.М., Добро Л.Ф., Матвеекин М.П., Митина О.Е.. Лабораторный практикум по оптике: в 2 ч. Краснодар, 2004. Ч. 1.
16. Открытая физика. ООО “Физикон”, 2005. 2 CD – ROM / под ред. Козела С.М.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Определение показателей преломления твердых и жидких оптических сред.....	4
2. Изучение законов фотоэффекта.....	13
3. Проверка закона Малюса. Изучение вращения плоскости поляризации.....	29
4. Изучение зрительной трубы и микроскопа.....	37
5. Определение концентрации раствора поляриметром.....	54
6. Изучение явления дифракции.....	61
7. Исследование оптических систем.....	74
8. Спектрофотометры ФМ-56,ФОУ. Оптические характеристики стекол.....	87
Рекомендуемая литература.....	94

Учебное издание

Добро Людмила Федоровна
Богатов Николай Маркович
Митина Ольга Евгеньевна

ОПТИКА

Лабораторный практикум
Часть 1

Подписано в печать 25.06.12. Формат 60×84 1/16.
Печать цифровая. Уч. О – изл.л.5,5. Тираж 500 экз.
Заказ № .

Кубанский государственный университет.
350040 г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.

Издательско-полиграфический центр КубГУ.
350040 г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.