

ПРЕДИСЛОВИЕ

В предлагаемом пособии даны общие сведения о свете, как физическом объекте, а также основные термины, понятия и законы, непосредственно используемые при выполнении лабораторных работ по курсу «Физика цвета».

Лабораторный практикум – это неотъемлемая и очень важная часть любой изучаемой дисциплины. Если осваивать теорию и решать задачи можно и дома, то для выполнения измерений необходимо прийти в лабораторию в отведённые для этого часы занятий. Пропуск таких занятий всегда влечёт за собой неприятные последствия – задолженности, отработки, финансовые потери и др.

Лабораторный практикум по курсу «Физика цвета и психология восприятия» предназначен для закрепления теоретического материала, приобретения навыков оптических измерений, статистической и графической обработки полученных в лаборатории результатов. Особенностью данного практикума является то, что он предназначен для студентов, в программе обучения которых нет общего курса физики, где последовательно закладываются базовые физические понятия и используется соответствующий математический аппарат. В связи с этим мы попытались выделить только те термины, понятия и законы, которые непосредственно используются при выполнении каждой лабораторной работы.

Для успешного прохождения лабораторного практикума необходимо систематически и последовательно прорабатывать конспект лекций и выполнять домашние задания, в том числе и оформлять лабораторные отчёты по выполненным измерениям. В ходе своей учебной деятельности полезно следовать приведённым ниже правилам и рекомендациям.

Правила безопасного поведения в лаборатории оптики

Питание приборов в лаборатории осуществляется от сети с напряжением 220 В, поэтому при нарушении изоляции на металлических корпусах приборов может возникнуть напряжение, опасное для жизни человека. В связи с этим студентам запрещается проводить любые несанкционированные работы.

В лаборатории в нескольких работах используются лазеры средней мощности (от 1 до 75 мВт), которые относятся к третьему классу безопасности. Такие лазеры и лазерные системы могут вызвать травмирование органов зрения при прямом попадании луча в глаз. Травму может вызвать и направленное отражение луча, например от зеркала. Поэтому следует избегать попадания в глаза прямого и отражённого лазерного луча. **Смотреть прямо на луч лазера опасно!**

При выполнении лабораторных работ студентам **запрещается:**

- 1) приступать к выполнению работы, не имея допуска на выполнение данной лабораторной работы;
- 2) выполнять действия, не связанные напрямую с лабораторной работой;
- 3) подавать питание на собранную схему без проверки правильности соединений преподавателем или лаборантом;
- 4) использовать для выполнения лабораторной работы оборудование, не входящее в комплект работы, без соответствующих указаний преподавателя;

5) производить переключения в собранных схемах при включённом питании;
6) уходить из лаборатории по окончании работы, не представив результаты измерений руководителю работ и не сдав полученное оборудование. Разборка схемы допускается только после проверки преподавателем результатов измерений. **Перед разборкой схемы необходимо выключить источники питания.**

Если во время проведения работы замечены какие-либо неисправности оборудования, то необходимо сообщить об этом преподавателю или лаборанту.

В лаборатории запрещается курить, шуметь, осуществлять приём пищи и напитков, пользоваться сотовыми телефонами.

Методические указания и рекомендации студентам

Выполнение лабораторной работы включает три этапа:

– **получение допуска** (проверка знаний по теории, по методике проведения измерений, по обработке данных, полученных при измерениях);

– **выполнение измерений**;

– **оформление отчёта** по установленной форме и его сдача на проверку **через неделю** (не позже!) после выполнения измерений. Без предъявления отчёта к следующей лабораторной работе студент **не допускается!**

Первые два пункта выполняются на лабораторном занятии, а подготовка к допуску и оформление отчёта – в часы самостоятельной работы. *(Напоминаем, что на самостоятельную работу планируется не меньше времени, чем на аудиторские занятия – 2 часа в неделю).*

Измерения проводятся после получения допуска у преподавателя, и с разрешения руководителя в лаборатории. Результаты измерений заносятся чернилами (пастой) в личный **черновик** с заранее заготовленными таблицами. В заголовке черновика – фамилия студента, номер группы, название лабораторной работы, отметка о допуске, и дата выполнения измерений. По окончании измерений черновик нужно предъявить руководителю для получения удостоверяющей подписи. Исправления в подписанном черновике не допускаются!

Отчёт выполняется на двойном тетрадном листе вручную каждым студентом самостоятельно строго по указаниям в описании лабораторной работы, и только по своим измерениям. Все расчёты – в единицах системы СИ. В отчёт вкладывается заверенный черновик – без черновика отчёт не проверяется! Выполненные (на миллиметровке!) графики прикрепляются к отчёту. Форма и образцы отчётов представлены на планшетах в лаборатории.

Отчёты с ошибками возвращаются студенту с указаниями места и смысла ошибок. На их исправление в отчёте даётся ещё **одна неделя**. Принятые отчёты не возвращаются!

Если по вине студента отчёт не принят в течение этого срока (**две недели!**), то результаты измерений аннулируются, и студенту предоставляется возможность вновь выполнить лабораторную работу (все три этапа!) в дополнительно оплаченное время. Пропущенные и просроченные лабораторные работы выполняются в конце семестра группами не более 8-10 человек с оплатой, предусмотренной за

оказание дополнительных образовательных услуг (каждая лабораторная работа – 2 часа).

Зачёт в конце семестра получают студенты, выполнившие все лабораторные работы и другие домашние задания, при условии получения положительной оценки в ходе итогового опроса или тестирования.

Помните! Только систематическое, своевременное и самостоятельное выполнение всех заданий гарантирует успех и предотвращает опасность попадания в непочётную категорию «хвостистов»!

ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ЗАКОНЫ ОПТИКИ

Чтобы осознанно выполнять рекомендуемые в описании конкретных лабораторных работ действия, студентам необходимо при внеклассной подготовке к очередной работе прочитать и освоить приведённые здесь теоретические знания.

Свет как физический объект

Напомним некоторые элементарные сведения из оптики – раздела физики, в котором изучаются свойства и действия света. Светом называют электромагнитное излучение, испускаемое нагретым или находящимся в возбуждённом состоянии веществом. Под светом в широком смысле понимают не только *видимый свет*, который воспринимается человеческим глазом и вызывает зрительные ощущения, но и примыкающие к нему области электромагнитного спектра [1].

Электромагнитные колебания распространяются в вакууме с наибольшей в природе скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с (300 тысяч километров в секунду), образуя *электромагнитные волны*. Расстояние, которое проходят электромагнитные колебания за один период T , называют *длиной волны*

$$\lambda = cT. \quad (1)$$

Видимый свет – это электромагнитное излучение с длинами волн приблизительно от 400 до 760 нм (от фиолетового до красного) (1 нм = 10^{-9} м; нм – обозначение нанометра – единицы измерения малых длин). Если расположить области электромагнитного спектра в порядке увеличения длины волны (рис. 1), то слева от видимого диапазона будет область *ультрафиолетового* (УФ) излучения ($\lambda < 380$ нм), а справа – область *инфракрасного* (ИК) излучения ($\lambda > 760$ нм).



Рис. 1

Количество света (например, яркость, интенсивность, освещённость) зависит от амплитуды световой волны, а качество света – цвет – от её частоты.

В зависимости от соотношения между длиной волны и размерами d объектов свет может рассматриваться либо как электромагнитная волна (*волновая оптика*: $d \approx \lambda$), либо как поток *фотонов* – частиц, обладающих энергией и нулевой массой (*квантовая оптика*: $d \ll \lambda$). Если же размеры объектов намного больше длины волны ($d \gg \lambda$), то используется приближение *геометрической оптики*.

Геометрическая оптика. Показатель преломления

Для выполнения лабораторной работы № 1 потребуется применение законов геометрической оптики. В основе геометрической оптики лежит представление о прямолинейном распространении света в однородной среде. *Лучом света* называют ту линию, вдоль которой распространяется свет, испущенный источником. В однородной среде эта линия – прямая. При плавном изменении оптических свойств среды, в которой распространяется свет, ход луча искривляется.

На границе раздела двух прозрачных сред свет частично отражается от границы, и частично переходит во вторую среду, и в новой среде распространяется уже с другой скоростью, величина которой зависит от оптических свойств среды.

Оптические свойства среды принято характеризовать *абсолютным показателем преломления n* . Его величина равна отношению скорости света в вакууме к скорости света v в данной среде:

$$n = \frac{c}{v}. \quad (2)$$

Из определения видно, что показатель преломления для вакуума равен единице. Для всех остальных сред он больше единицы, поскольку скорость света в пустоте больше его скорости в любой среде.

В зависимости от значения показателя преломления прозрачные среды делят на оптически более плотные и менее плотные. Чем больше показатель преломления, тем больше *оптическая плотность*. Экспериментально определённые средние значения показателя преломления для некоторых прозрачных веществ приведены в табл. 1 [2].

Таблица 1

Показатели преломления различных веществ для средней части видимого спектра при атмосферном давлении 10^5 Па и температуре 20°C

Вещество	n	Вещество	n
Воздух	1,0003	Лёд	1,31
Вода	1,33	Сахар	1,56
Спирт этиловый	1,36	Стекло (лёгкий крон)	1,57
Ацетон	1,36	Стекло (тяжёлый флинт)	1,80
Глицерин	1,47	Алмаз	2,42

Изменение скорости световой волны при переходе в другую среду вызывает изменение направления луча – *преломление света*.

Дисперсия. В вакууме световые волны любой частоты (любого «цвета») распространяются с одинаковой скоростью. Однако в материальной среде скорость света зависит не только от оптической плотности среды, но и от длины волны. Поскольку излучения с определённой длиной волны вызывает зрительное ощущение определённого цвета, то с некоторой натяжкой можно говорить о зависимости скорости света в среде, а значит и показателя преломления, от цвета луча. Зависимость показателя преломления от длины волны называется *дисперсией показателя преломления*.

Показатели преломления в зависимости от длины волны для двух сортов стекла и двух различных жидкостей представлены в табл. 2 [2].

Таблица 2

Дисперсия показателя преломления различных материалов

Длина волны λ в нм (цвет)	Показатель преломления			
	Стекло, тяжёлый флинт	Стекло, лёгкий крон	Сероуглерод	Вода
656,3 (красный)	1,6444	1,5145	1,6219	1,3311
589,3 (жёлтый)	1,6499	1,5170	1,6308	1,3330
486,1 (голубой)	1,6657	1,5230	1,6799	1,3371
404,7 (фиолетовый)	1,6852	1,5318	1,6990	1,3428
$\Delta n = n_{\phi} - n_{\kappa}$	0,0408	0,0173	0,0771	0,0117

Как следует из таблицы, зависимость n от длины волны довольно слабая. Величину дисперсии можно оценить по изменению Δn абсолютного показателя преломления при одном и том же изменении длины волны. Наибольшей дисперсией здесь обладает сероуглерод, наименьшей дисперсией – вода.

Поведение светового луча на границе раздела двух сред описывается двумя законами:

1. **Закон отражения света.** Падающий луч 1 и отраженный луч 2 лежат в одной плоскости с перпендикуляром к поверхности в точке падения луча. Угол падения i , образованный нормалью к отражающей поверхности и падающим лучом, равен углу отражения i' , образованному этой же нормалью и отражённым лучом (рис. 2).

2. **Закон преломления света.** Лучи падающий 1 и преломлённый 3 лежат в одной плоскости с перпендикуляром к границе раздела двух сред, и отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению абсолютных показателей преломления сред:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (3)$$

где n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления первой и второй среды. Индекс «1» присвоен среде, из которой луч идёт, а «2» – среде, в которую он переходит.

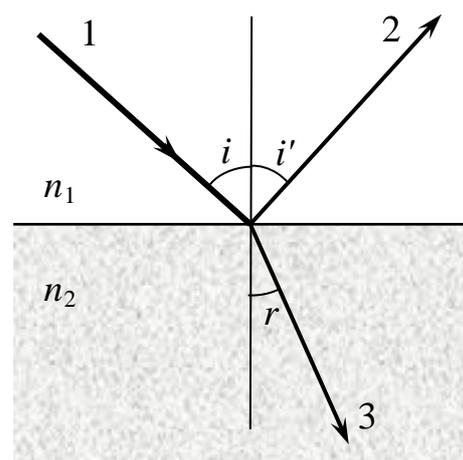


Рис. 2

Состав белого света. Спектры

Так как показатель преломления зависит от длины волны, то световые волны разной длины (лучи разных цветов) будут преломляться на различные углы. Как видно из табл. 2, при переходе из воздуха ($n_1 = 1,000$) меньше других отклоняются лучи красного цвета, а самое сильное преломление испытывают лучи фиолетового цвета. Один из самых наглядных примеров дисперсии света – разложение белого света при прохождении его через призму (опыт И. Ньютона): солнечный луч при преломлении разлагается на семь близко расположенных лучей разного цвета: *красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий, фиолетовый*. (Первые буквы соответствуют известной фразе для запоминания порядка следования цветов радуги: «каждый охотник желает знать, где сидит фазан»). Эти цвета называют цветами непрерывного солнечного спектра. Подобные спектры дают нагретые до высокой температуры (больше 1500–2000 °С) твёрдые и жидкие тела.

В оптике *спектром* (видение, греч.) принято называть картину, которая получается при разложении света, идущего от конкретного источника, на составляющие его цвета. Спектр разных световых источников не всегда содержит все цвета. Существуют разные типы спектров, которые будут подробно рассмотрены в лабораторной работе № 6. Спектр называют *дисперсионным*, если он появился в результате дисперсии света при прохождении сквозь преломляющую среду. С явлением дисперсии вы познакомитесь в двух лабораторных работах: в первой работе вы изучите само явление, а в шестой будете наблюдать дисперсионный спектр. Другие (не дисперсионные) способы получения спектра будут рассмотрены ниже, после ознакомления с элементами волновой оптики.

Лучевая (или геометрическая) оптика является первым этапом развития учения о свете. Её законы применяются в важном разделе – учении об оптических инструментах (фотоаппарат, проектор, микроскоп, телескоп, бинокль и др.)

Элементы волновой оптики

Введём основные понятия, необходимые для описания *волнового движения*. Определим *волну* как колебательное движение, передающееся в пространстве от точки к точке.

Колебательным называют движение, повторяющееся периодически. Основные понятия, описывающие этот вид движения и присущие ему закономерности легче всего усвоить на простом примере механических колебаний. На рис. 3 изображён математический маятник. Отклонение его от положения равновесия – смещение x – это периодически меняющаяся с течением времени величина. Максимальное значение этого смещения называют *амплитудой* колебаний: $A = x_{\max}$.

Если тело, выйдя из некоторого состояния, вновь в него вернулось, то говорят, что оно совершило *полное*

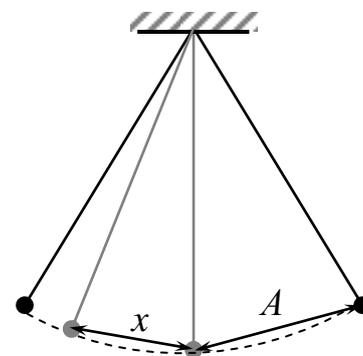


Рис. 3

колебание. Время одного полного колебания называют *периодом* T колебаний. Величину, обратную периоду, называют *частотой* ν :

$$T = \frac{t}{N}; \quad \nu = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}. \quad (4)$$

Здесь N – число полных колебаний, совершаемых за время t . За единицу измерения частоты принят *герц* (Гц): $1 \text{ Гц} = 1/\text{с}$.

Колебательное движение можно представить либо в виде уравнения, либо наглядно в виде графика зависимости изменяющейся величины x от времени t (рис. 4). Уравнение, соответствующее представленному графику синусоиды, имеет вид

$$x = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) = A \sin(2\pi\nu t). \quad (5)$$

Выражение, взятое здесь в скобки, называется *фазой колебаний* и обозначается обычно буквой φ .

При сложении двух колебательных движений с одинаковой частотой, происходящих в одной плоскости, колебания могут усиливаться или ослабляться, в зависимости от того, какова *разность фаз* $\Delta\varphi$ этих колебаний. На рис. 5 изображены графики двух колебаний с амплитудами A_1 и A_2 и одинаковыми периодами. Если фазы этих колебаний одинаковы ($\Delta\varphi = 0$, рис. 5, а), то в результате сложения получится колебание с увеличенной амплитудой $A_{\max} = A_1 + A_2$. Если же фазы колебаний противоположны ($\Delta\varphi = \pm\pi$, рис. 5, б), то колебания ослабляются и результирующее колебание будет иметь уменьшенную амплитуду $A_{\min} = |A_1 - A_2|$.

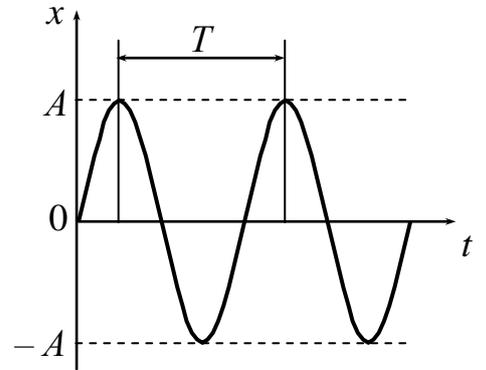


Рис. 4

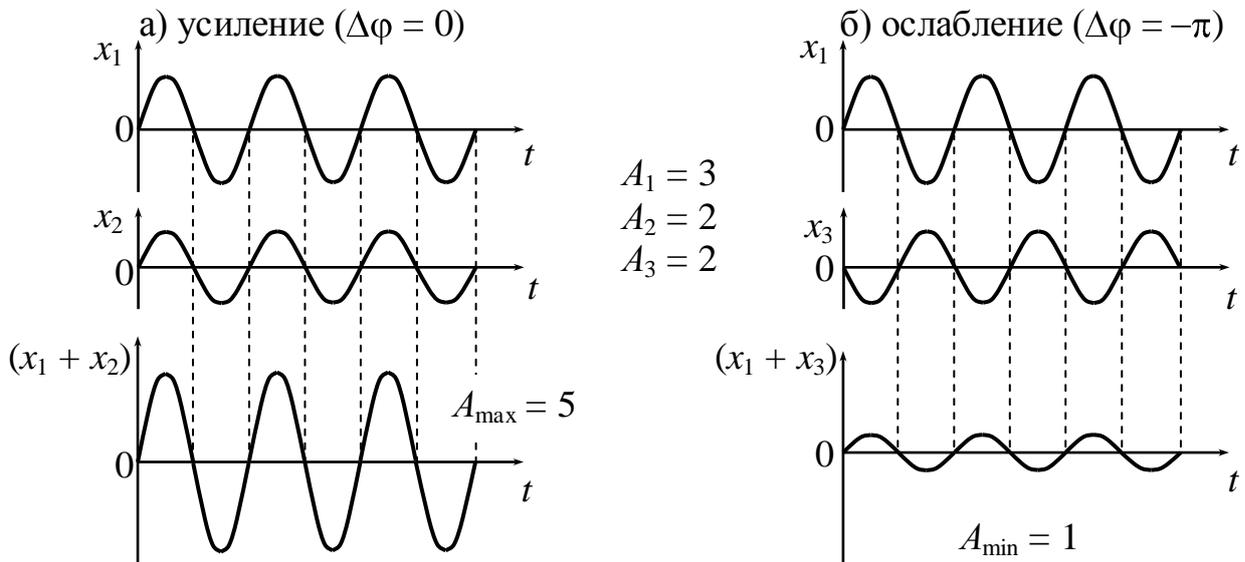


Рис. 5

Такое наложение колебаний, когда они либо усиливают, либо ослабляют друг друга, называется *интерференцией*. Для проявления интерференции необходимо выполнение *условий когерентности*. Если колебания не когерентны (не согласованы друг с другом), *наложение их друг на друга не усилит и не ослабит колеба-*

тельное движение, а лишь его усреднит. Понятия интерференции и когерентности характерны для волнового движения и объясняют многие явления, происходящие при наложении световых волн и дающие красивые цветовые эффекты, которые можно наблюдать в природе, а можно и создать искусственно.

Для наблюдения интерференции волны должны быть когерентными (согласованными), то есть иметь хотя бы одинаковую частоту. Если же мы хотим наблюдать интерференцию от двух разных источников света, то когерентными должны быть сами источники волн. Элементарным источником световой волны является атом. Излучение атомов, как и их движение, беспорядочно, хаотично. Поэтому обычные источники света, свет от которых есть совокупность волн, испущенных разными атомами, всегда не когерентны из-за хаотичности процессов, связанных с излучением света. Примером когерентного источника излучения света является лазер, в котором атомы излучают согласованно. *Излучение лазера когерентно.* Именно когерентность обеспечивает лазерному лучу его уникальные свойства.

Характеристики колебательного движения: период T , частота ν , амплитуда A применимы и для описания световой волны. Но к этим характеристикам необходимо добавить, по крайней мере, ещё две: скорость распространения волны υ и длину волны λ .

Скорость волны – это скорость передачи колебательного движения от точки к точке. Величина скорости определяется физической природой колебаний (звуковые, электромагнитные) и свойствами среды, в которой распространяется волна. Например, *звуковые* волны распространяются в воде со скоростью приблизительно 1500 м/с, а в воздухе скорость звука почти в 5 раз меньше, около 330 м/с. *Электромагнитные* волны светового диапазона распространяются в пустоте и в воздухе со скоростью $c \approx 300\,000$ км/с, а в воде со скоростью $\upsilon \approx 225\,000$ км/с. Как уже указывалось ранее (см. формулу (2)), отношение скорости света c в вакууме к скорости света υ в любой среде называется абсолютным показателем преломления n , который всегда больше единицы.

Длина волны была определена выше (см. формулу (1)) – это расстояние, которое волна проходит за промежуток времени, равный одному периоду колебаний:

$$\lambda = \upsilon T. \quad (6)$$

Заменив период частотой, получим, что длина волны прямо пропорциональна её скорости и обратно пропорциональна частоте колебаний:

$$\lambda = \frac{\upsilon}{\nu}. \quad (7)$$

Если волна переходит из одной среды в другую, то меняются и скорость, и длина волны. Но *частота* при этом *не изменяется*, поскольку задаётся источником и является характеристикой колебаний. В случае световой волны именно частотой определяется её цвет, который остаётся неизменным при переходе из среды в среду. Поэтому, строго говоря, в характеристике цвета нужно указывать частоту, а не длину волны, как это принято в учебных и справочных пособиях. Подобная замена корректна лишь для случая распространения света в вакууме, где скорость его одинакова для световых волн любого цвета, а точнее – для электромагнитных волн любой частоты. Использование длины волны в характеристи-

ках цвета связано с тем, что скорость света в воздухе практически равна c . Вторая причина заключается в том, что длину волны на опыте определить просто, а частоту – сложно, так как частота колебаний в световой волне очень велика: для середины видимого диапазона ($\lambda = 600$ нм)

$$\nu = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{6 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}, \quad (8)$$

то есть 500 триллионов колебаний в секунду!

Необходимо отметить, что частота является чисто *физической* характеристикой волны, а вызываемое ею цветовое ощущение обусловлено сложными *физиологическими* процессами. Эти процессы происходят не только в сетчатке глаза, но и существенным образом определяются деятельностью мозга. О некоторых особенностях восприятия света глазом речь пойдёт в третьей лабораторной работе. В других работах механизм восприятия света никак не задействован, поэтому здесь мы его не касаемся.

Интерференция света. Волны, так же как и колебания, накладываясь друг на друга, могут интерферировать, т.е. давать в некоторых точках пространства максимумы, усиливая друг друга, а в других, соседних точках – минимумы. Если накладываются *световые волны*, то чередование максимумов и минимумов образует интерференционную картину – чередование светлых (максимумы) и тёмных (минимумы) полос. Как и при сложении колебаний, волны должны быть *когерентными*. В случае некогерентных волн их наложение просто увеличит освещённость. Например, при двух лампочках светлее, чем при одной – и никаких тёмных и светлых полос!

Чтобы разобраться, почему интерференция света и другие оптические явления сопровождаются цветовыми эффектами, введём понятие оптической разности хода. *Оптическая разность хода* равна разности оптических длин путей двух световых лучей (рис. 6), имеющих общие начальную и конечную точки [2]:

$$\Delta_{\text{опт}} = l_2 n_2 - l_1 n_1. \quad (9)$$

Оптическая длина пути отличается от геометрической: она получается умножением геометрической длины луча l на показатель преломления среды n , в которой распространяется свет: $l_{\text{опт}} = ln$. Для вакуума оптическая длина совпадает с геометрической, а в любой среде $l_{\text{опт}} > l$. На рис. 6 исходный луч в точке B разделяется на два когерентных луча, которые затем соединяются в т. C . Верхний луч проходит путь l_1 в среде с показателем преломления n_1 , нижний – путь l_2 в среде с показателем преломления n_2 , и в точке C может наблюдаться интерференция.

Сформулируем условия, при которых возможно наблюдать появление максимумов и минимумов освещённости предмета при освещении его двумя когерентными источниками.

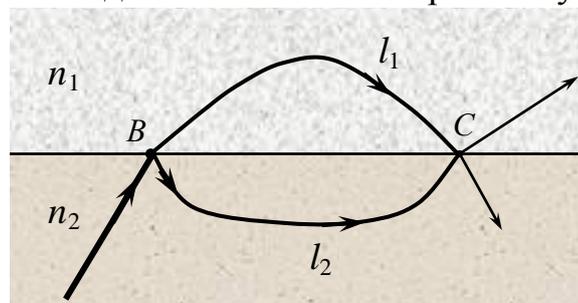


Рис. 6

- Волны *усиливают* друг друга, если оптическая разность их хода составляет *целое число длин волн* или *чётное число* полуволн,

$$\Delta_{\text{опт}} = k\lambda = 2k \frac{\lambda}{2} - \text{условие максимумов.} \quad (10)$$

- Волны *ослабляют* друг друга, если оптическая разность их хода составляет *полуцелое число длин волн* или *нечётное число* полуволн,

$$\Delta_{\text{опт}} = (k\lambda + \frac{\lambda}{2}) = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} - \text{условие минимумов.} \quad (11)$$

Формулы (10) и (11) называются *условиями максимумов и минимумов* при интерференции света. В них k – целое число, равное $\pm (0, 1, 2, 3, \dots)$.

Появление минимумов и максимумов при наложении волн вы будете наблюдать во второй лабораторной работе. Рассмотрим, какой вид будет иметь наблюдаемая интерференционная картина.

Если источник света даёт *монохроматическую волну* (излучает свет одной частоты), то в направлениях или в точках, где выполняется условие максимума, вы увидите полосы соответствующего цвета (светлые полосы). В тех точках, для которых выполняется условие минимума, световые волны погасятся, и там будут наблюдаться тёмные полосы. При изменении длины волны изменится не только цвет, но и положение тёмных и светлых полос – интерференционная картина сместится, поскольку положение максимумов и минимумов, как следует из формул (10) и (11), зависит от длины волны.

Если источник даёт *белый свет*, то максимумы разного цвета будут наблюдаться в разных точках освещаемого предмета, и вы увидите примыкающие друг к другу разноцветные полосы, т.е. *спектр*. Разложение белого света в этом случае происходит благодаря интерференции, поэтому такой спектр называют *интерференционным*. В случае монохроматического света, например, красного, наблюдаемая картина будет состоять из чередующихся чёрных и красных полос.

В этой же лабораторной работе № 2 вы на практике познакомитесь ещё с одним явлением, характерным только для волнового движения: волны огибают препятствие, т.е. отклоняются от прямолинейного пути.

Дифракция света. Отклонение световых волн от прямолинейного пути при прохождении вблизи краёв отверстий, щелей или других неоднородностей называется *дифракцией*. Объяснение дифракции даёт *принцип Гюйгенса – Френеля*, согласно которому каждая точка, до которой дошли колебания, становится точечным источником вторичных волн. *Вторичные волны когерентны*, поскольку все они образовались от первичной волны, и после отверстия должна наблюдаться интерференционная картина, что и показывает опыт.

На рис. 7 изображены параллельные лучи, которые после отверстия становятся расходящимися из-за дифракции на краях отверстия. На этом же рисунке показано, что отклонённый луч может встретиться с прямым

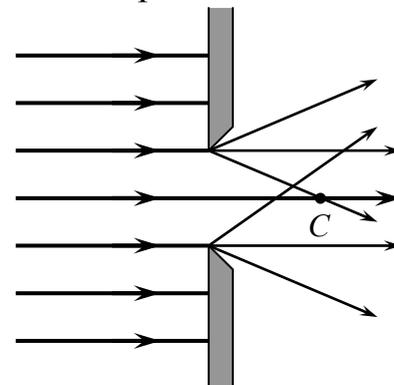


Рис. 7

лучом, например, в точке C . До этой встречи лучи прошли разные пути, следовательно, приобрели разность хода. Так как они когерентны, то в точке C может образоваться максимум или минимум, в зависимости от соотношения между длиной волны и величиной разности хода (см. формулы (10), (11)). Поэтому после отверстия будет наблюдаться интерференционная картина, подобная только что описанной выше: при освещении монохроматическим светом – чередование тёмных и светлых полос одного цвета, а при освещении белым светом образуется разноцветный спектр. Спектр, причиной которого является дифракция, называют *дифракционным*.

Аналогичные изменения света и цвета будут иметь место после любого препятствия на пути световой волны, если его размеры не меньше длины волны. Особенно яркие дифракционные спектры получаются, если свет проходит через несколько параллельных щелей – дифракционную решётку.

Поперечность световых волн. Поляризация света

Какова же *природа* световой волны? Ещё в 1846 г. Фарадею удалось показать, что оптические явления не представляют собой изолированного класса процессов: он наблюдал влияние магнитного поля на распространение света. Максвелл (1865 г.) на основании своих исследований заключил, что свет есть *электромагнитная волна*. Показатель преломления n он связал с электрической и магнитной характеристиками среды.

Электромагнитной волной называют распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле. *Электромагнитное поле* – это совокупность переменных электрического и магнитного полей, неразрывно связанных друг с другом. Электрическое поле характеризуют напряжённостью \vec{E} , магнитное поле – напряжённостью \vec{H} . Напряжённости полей – векторные величины, т.е. имеют величину и направление, которые в электромагнитной волне периодически меняются. Распространяющиеся поля связаны друг с другом, одно не появляется без другого. Напряжённости \vec{E} и \vec{H} в электромагнитной волне всегда перпендикулярны друг другу, а направление распространения перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы \vec{E} и \vec{H} . На рис. 8 изображена плоская электромагнитная волна, распространяющаяся вдоль оси Ox со скоростью \vec{v} . Вектор \vec{E} колеблется в вертикальной плоскости, вектор \vec{H} – в горизонтальной.

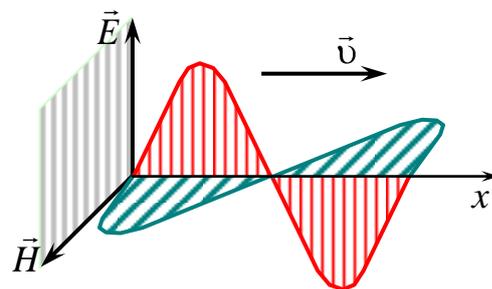


Рис. 8

Волны, у которых направление колебаний перпендикулярно направлению распространения, называются *поперечными*. Следовательно, электромагнитные волны вообще, и световые волны, в частности – это волны *поперечные*. (Напомним, что в *продольной* волне направление колебаний и направление распространения параллельны друг другу).

Поперечные волны обладают одной интересной особенностью, не свойственной продольным волнам. Для того чтобы её понять, представим себе, что мы пропускаем сквозь узкую щель продольную волну и наблюдаем, как изменяется её амплитуда при повороте щели вокруг направления распространения волны. Очевидно, что поворот никак не повлияет на амплитуду и интенсивность продольной волны, поскольку продольные колебания свободно проходят сквозь щель при любой её ориентации относительно луча. А в случае поперечной волны также очевидно, что при повороте щели будет поворачиваться плоскость колебаний, и изменяться амплитуда прошедшей волны (рис. 9).

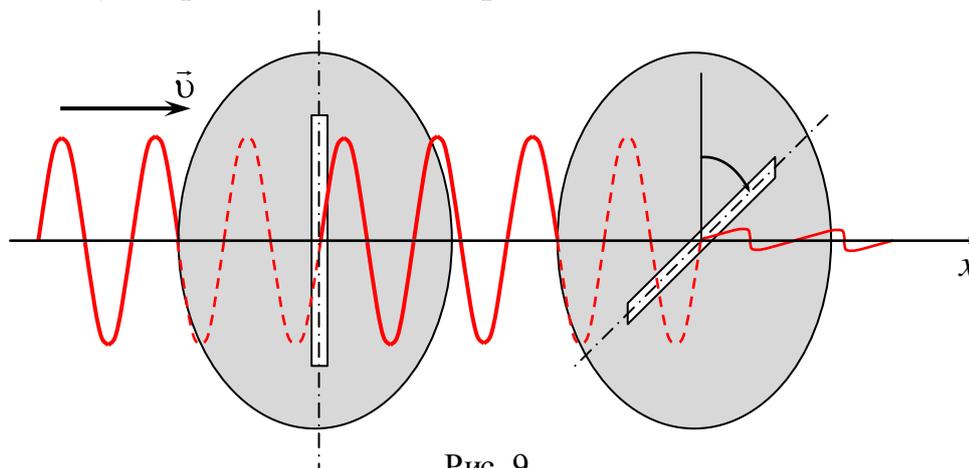


Рис. 9

Эта особенность поперечных колебаний называется *поляризацией*. Каждый элементарный источник света (атом) излучает волну с определённой ориентацией векторов \vec{E} и \vec{H} , т.е. определённым образом поляризованную. Однако любой обычный источник света состоит из множества атомов, каждый из которых излучает свою поперечную волну, не «советуясь» с другими атомами. Поэтому излучение будет состоять из множества поперечных волн с хаотической ориентацией векторов \vec{E} и \vec{H} в плоскости, перпендикулярной направлению распространения. Такой свет называют *естественным*. Свет, в котором ориентации векторов \vec{E} и \vec{H} в любой точке пространства остаются неизменными с течением времени, называется *линейно поляризованным*. В лазерах атомы излучают согласованно, и свет от лазера может быть не только когерентным, но и поляризованным.

Способы получения поляризованного света из естественного, а также вращение плоскости поляризации при распространении света в некоторых веществах описаны в лабораторной работе № 5. Там же объясняются причины образования разных цветов при прохождении белого света через два поляроида.

Энергия света. Энергетические и световые величины

Энергия света – это энергия электромагнитных волн или энергия фотонов, испускаемых телом. *Потоком излучения* называется количество энергии, переносимой электромагнитной волной через произвольную поверхность за одну секунду:

$$\Phi_{\text{э}} = \frac{\Delta W}{\Delta t}. \quad (12)$$

Поток излучения, оцениваемый по его воздействию на человеческий глаз, называется *световым потоком*. Энергетический поток измеряется в *ваттах* (Вт), а световой поток – в *люменах* (лм).

Глаз имеет разную чувствительность к потокам света с различными длинами волн. При дневном освещении средний глаз наиболее чувствителен к свету с длиной волны 555 нм (жёлто-зелёный цвет). Отношение потока излучения Φ_{555} к потоку излучения Φ_λ с длиной волны λ , которое вызывает ощущение такой же яркости, что и поток излучения Φ_{555} , называется относительной спектральной чувствительностью глаза или, иначе, *относительной видностью*

$$K_\lambda = \frac{\Phi_{555}}{\Phi_\lambda}. \quad (13)$$

Значения относительной видности у разных людей различны, однако эти различия для людей с нормальным зрением незначительны. В литературе [3] приводятся таблицы относительной чувствительности, усреднённой по нескольким сотням испытуемых. Так, для 440 нм (фиолетовый цвет) $K_\lambda = 0,023$, а для 720 нм (темно-красный) $K_\lambda = 0,00105$ – всего 0,1 % от максимальной чувствительности.

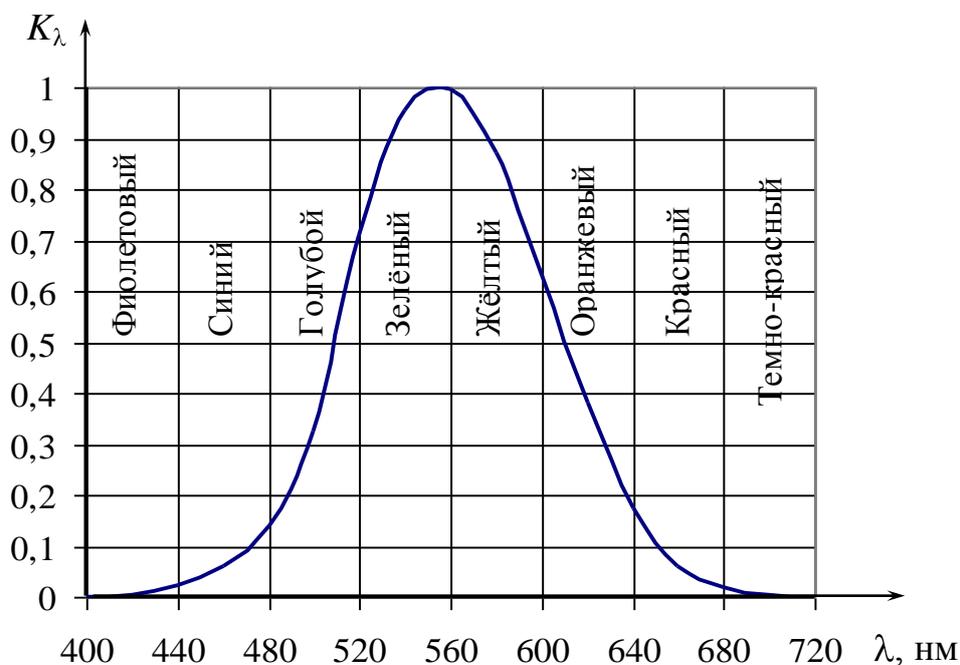


Рис. 10

График зависимости K_λ от длины волны называется *кривой видности* (рис. 10).

Проведя на графике горизонтальную прямую, соответствующую видности 0,5 (50 % от максимальной чувствительности), определяют среднюю полосу пропускания глаза. Как видно из рис. 10, полоса пропускания (от 510 до 610 нм) гораздо уже видимого диапазона длин волн (от 380 до 760 нм). При недостаточной освещённости (сумеречное зрение) максимальная чувствительность глаза приходится на длину волны 507 нм, т.е. смещается в сторону синего цвета.

При дневном зрении энергетическому потоку излучения 1 Вт с длиной волны 555 нм соответствует световой поток 683 люмена.

Энергетические и световые характеристики излучения используются при выполнении лабораторной работы № 4, где исследуется зависимость мощности потока излучения и его цвет от температуры излучающего тела.

Определения и единицы измерения основных энергетических и световых характеристик излучения приведены в Приложении 2.

В лабораторной работе № 3 исследуется зависимость плотности потока излучения от расстояния между источником и приёмником света и определяется относительная спектральная чувствительность фотоэлемента.

Лабораторная работа № 1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ СТЕКЛА ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ

Цель работы: ознакомиться с явлением дисперсии света, рассчитать показатели преломления для лучей различного цвета по измеренным расстояниям от линзы до изображения, определить зависимость показателя преломления стекла от длины световой волны.

Оборудование: блок питания лампы, оптическая скамья и установленные на ней: источник света, набор светофильтров, предмет (слайд), линза, экран.

Краткая теория

При подготовке к этой лабораторной работе нужно изучить сведения, изложенные на стр. 5–8 данного учебного пособия. Вспомним некоторые определения, формулы и правила построения изображений в линзе.

Линза – это прозрачное тело с показателем преломления $n > 1$, ограниченное сферическими поверхностями. На рис. 1.1, а дано схематическое изображение двояковыпуклой линзы; R_1, R_2 – радиусы, C_1, C_2 – центры сферических поверхностей.

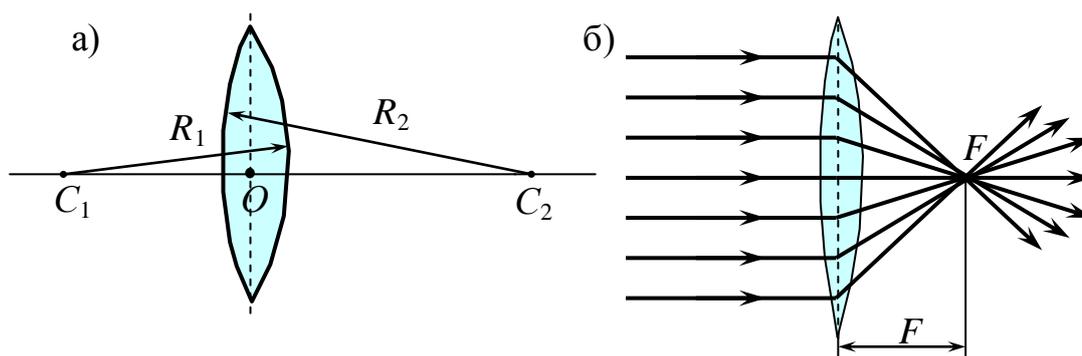


Рис. 1.1

Линза называется *тонкой*, если её толщина значительно меньше радиусов кривизны её поверхностей. Прямая, проходящая через центры сферических поверхностей, называется *главной оптической осью линзы*. Точка тонкой линзы, через которую все лучи проходят, не изменяя своего направления, называют *оптическим центром линзы*. Перпендикулярная главной оптической оси плоскость, в которой лежит центр линзы, называется *плоскостью линзы*.

рисунка, изображение будет действительным, увеличенным и перевернутым. Измерив расстояния d и f , можно вычислить оптическую силу по известной формуле тонкой линзы:

$$D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \quad (1.3)$$

а затем из формулы (1.2) выразить показатель преломления и вычислить его значение. Как показано на рис. 1.2, изображение в красном цвете должно получиться дальше от линзы, чем в синем цвете.

Описание установки

Установка для наблюдения дисперсии света изображена на рис 1.3. Она смонтирована на оптической скамье, в основании которой укреплена линейка с миллиметровыми делениями.

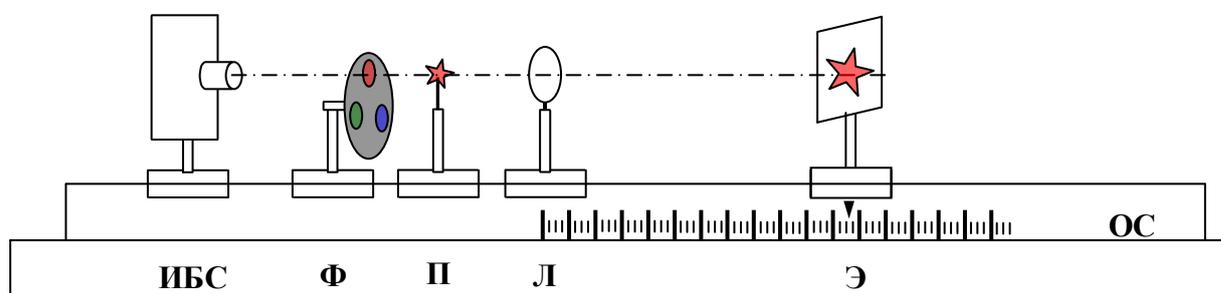


Рис. 1.3. ИБС – источник белого света; Ф – светофильтры; П – предмет; Л – линза; Э – полупрозрачный экран; ОС – оптическая скамья

Свет от лампы – источника *белого* света – проходит через один из трёх светофильтров, укрепленных на поворотной обойме Ф. На каждом светофильтре указана длина волны, которую пропускает светофильтр. Свет, теперь уже определенной длины волны, освещает рисунок, который нанесён на пластинку П из прозрачного материала. Линза Л расположена от предмета на расстоянии d , которое больше фокусного расстояния, т. е. реализован случай, для которого выше выполнено построение изображения (см. рис. 1.2). Все перечисленные предметы закреплены на скамье и менять между ними расстояние не нужно.

Резкое изображение рисунка нужно получить на полупрозрачном экране в проходящем свете. Изображение будет резким, только когда расстояние от линзы до экрана будет в точности равно f . Ваша задача состоит в том, чтобы найти на опыте и измерить это расстояние. Для этого следует перемещать экран до тех пор, пока изображение не станет максимально чётким.

Из-за дисперсии оптическая сила линзы, и, следовательно, фокусное расстояние, для лучей разного цвета будет различной, и изображение одного и того же предмета в разных цветах будет получаться на разных расстояниях f от линзы (см. рис. 1.2). Вам предстоит в этом убедиться, получив изображения предмета последовательно в красном, зелёном и синем свете. Приступая к работе, вы должны знать, как построить изображение предмета, при каком светофильтре расстояние до изображения будет минимальным.

Выполнение работы

1. Осмотрите лабораторную установку, определите расположение её элементов (см. перечень в разделе «Оборудование»).
2. Запишите в табл. 1.1 три цвета, соответствующие им длины волн светофильтров и указанные на оправе линзы значения радиусов сферических поверхностей.
3. Измерьте расстояние d между предметом и линзой, запишите в табл. 1.1.
4. С разрешения руководителя работ включите источник света.
5. Установите в рабочее положение *красный* светофильтр и отрегулируйте высоту предмета так, чтобы весь слайд освещался пучком света.
6. Перемещая экран вдоль оптической скамьи, и глядя на него со стороны, противоположной источнику света (на просвет), подберите такое положение экрана, при котором получается самое чёткое изображение предмета.
7. По линейке на оптической скамье измерьте расстояние f с точностью до миллиметров, и запишите его в соответствующую клеточку таблицы.
8. Проведите такие же измерения с зелёным светофильтром, а затем с синим, измеряя и записывая в таблицу соответствующие расстояния f для этих цветов.
9. Повторите измерения по пп. 5–8 ещё 2 раза. Все измерения проводите тщательно, добиваясь резкого изображения и точного отсчёта по миллиметровой линейке. В результате получится по 3 значения расстояния f для каждого цвета.
10. Отключите электропитание, покажите результаты измерений преподавателю. Получив у него подтверждающую подпись, наведите порядок на своём рабочем месте.

Таблица 1.1

$R_1 = \dots$ мм				$R_2 = \dots$ мм			
№ п/п	Цвет	λ , нм	d , мм	f , мм	$\langle f \rangle$, мм	D , дптр	n
1	Красный						
2							
3							
4	Зелёный						
5							
6							
7	Синий						
8							
9							

Анализ и обработка результатов измерений

Дома заполните три последние колонки табл. 3. Для этого:

- 1) вычислите средние значения расстояний $\langle f \rangle$ для каждого цвета;
- 2) по формуле (1.3) найдите среднее значение оптической силы исследуемой линзы для каждого цвета, подставляя в формулу соответствующие *средние значения* $\langle f \rangle$ в единицах СИ.

3) выразите из формулы (1.1) и вычислите показатель преломления для каждого цвета. Полученные значения заносите в соответствующие ячейки таблицы.

ВНИМАНИЕ! Все расчёты выполняйте с 3-мя знаками после запятой.

4) постройте график зависимости показателя преломления от длины волны;

5) проанализируйте полученные результаты, сформулируйте и запишите выводы. Для какого цвета показатель преломления минимален? Максимален? Поясните, на основании чего сделан вами вывод;

6) вычислите фокусное расстояние линзы и к отчёту приложите рисунок, где в масштабе покажите ход параллельных лучей белого цвета через линзу. Из прошедших линзу лучей следует показать только лучи двух цветов (по указанию преподавателя). Выполните их в цвете.

Контрольные вопросы

1. Назовите составные части лабораторной установки и их назначение.
2. Какие величины измеряются в данной работе непосредственно? Какие вычисляются?
3. Что называется абсолютным показателем преломления? От чего зависит его величина? Для какого цвета показатель преломления имеет наибольшее значение?
4. Что называют дисперсией света? Дисперсией показателя преломления?
5. Дайте определение оптической силы линзы и фокусного расстояния. Для лучей какого цвета фокусное расстояние максимально?
6. Выполните построение изображения в линзе для любого соотношения между d и F ($d > 2F$; $F < d < 2F$; $d < F$).
7. Запишите формулу тонкой линзы.
8. Выразите показатель преломления из формулы (1.2).

Лабораторная работа № 2.

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

Цель работы: познакомиться с дифракцией света, полученной с помощью дифракционной решётки, определить длины световых волн основных цветов.

Оборудование: оптическая скамья, источник белого света, линейка со щелью, дифракционная решётка.

Краткая теория

Для понимания этой работы вам необходимо изучить материал, изложенный в параграфе «Элементы волновой оптики» (с. 8–13). Прочтите его внимательно, до конца. Там вы познакомились с явлением дифракции и условиями её проявления: свет, как и любая волна, испытывает дифракцию при встрече препятствия, соразмерного длине волны. Препятствием может служить экран с отверстием любой формы – щелью, круглым отверстием. Им может быть и небольшой предмет, не

перекрывающий полностью пучок света, а лишь частично его закрывающий. В любом случае появляющаяся картина будет представлять чередование максимумов и минимумов, повторяющих форму препятствия. В случае щели это будут чередующиеся тёмные и светлые полосы, для круглого отверстия – окружности.

Дифракционный спектр в этой работе вы будете получать с помощью *дифракционной решётки*. Она представляет собой совокупность узких параллельных щелей, пропускающих свет, разделённых непрозрачными полосами. Каждая щель усиливает действие соседней, и картина получается существенно более яркой, чем от одной щели. Основной характеристикой решётки является *постоянная решётки* d – суммарная ширина прозрачной и непрозрачной полоски (рис.2.1). Эту величину называют также *периодом решётки*.

На рисунке из всех лучей, упавших на решётку, выделены два луча, прошедшие через неё на расстоянии d друг от друга. Эти лучи испытали дифракцию, т.е. отклонились от прямого пути на угол α . Поставленная на их пути линза собрала их в своём фокусе, где они наложились друг на друга. Результат наложения определяется той разностью хода Δ , которую они приобрели из-за отклонения от прямого пути. В точке A экрана будет наблюдаться *максимум* для длины волны λ , если разность хода этих волн кратна целому числу длин волн:

$$\Delta = k\lambda, \quad (2.1)$$

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ – целое число, называемое **порядком спектра**.

Как следует из рис. 2.1, разность хода Δ можно выразить через период d дифракционной решётки:

$$\Delta = d \sin \alpha. \quad (2.2)$$

Из выражений (2.1) и (2.2) легко получить условие дифракционных максимумов – **формулу дифракционной решётки**:

$$d \sin \alpha_k = k\lambda; \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots). \quad (2.3)$$

Из этого равенства следует, что угол отклонения лучей для всех максимумов (кроме нулевого, для которого k равно нулю) зависит от длины волны: чем больше λ , тем на больший угол отклоняется луч. Поскольку волны разной длины (а, значит, и разного цвета!) отклоняются на разные углы, то белый свет, упавший на решётку, разлагается в спектр. Максимум нулевого порядка будет белого цвета, потому что при $k = 0$ условие максимумов выполняется для всех длин волн.

В полученное соотношение (2.3) вошла интересующая нас величина – длина световой волны. Она выражена через величины, которые можно определить на опыте. О том, как это сделать, речь пойдёт ниже. Сейчас же мы заметим, что из формулы дифракционной решётки также можно получить условие наблюдения дифракции, о котором шла речь выше: ширина прозрачных и непрозрачных полос должна быть соразмерна длине волны, иначе дифракция наблюдаться не будет.

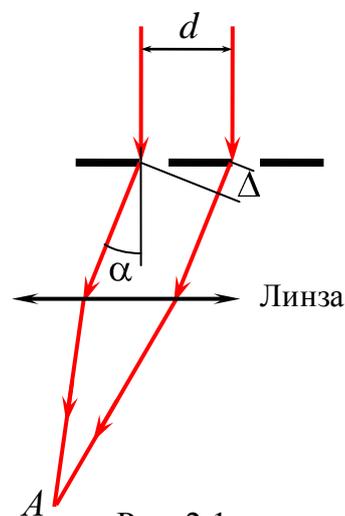


Рис. 2.1

Действительно, при $d \gg \lambda$ синус угла α и, следовательно, угол α в (2.3) будут стремиться к нулю, и дифракционные максимумы и минимумы будут накладываться друг на друга, создавая равномерную освещённость вместо полосатой картины.

Описание установки

Схема хода лучей в лабораторной установке для получения дифракционной картины и определения длины световой волны изображена на рис 2.2.

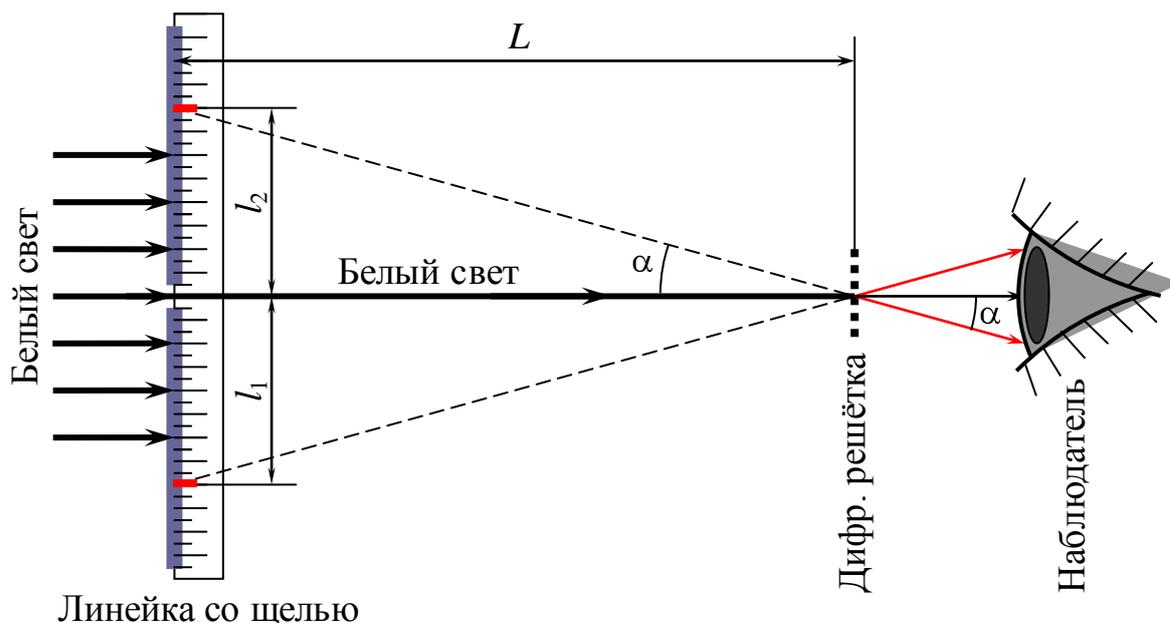


Рис. 2.2

Пучок белого света от лампы накаливания падает на узкую щель. Она нужна для того, чтобы вырезать из него лучи, идущие от небольшого участка источника, когерентные друг другу. В случае, если источником будет лазер, щель не нужна: атомы активной среды лазера излучают согласовано, свет от него когерентен.

Падая на решётку, свет частично проходит через неё прямо, частично отклоняется – дифрагирует. На рисунке показан и прямой луч, и два отклонённых на угол α симметрично вверх и вниз. Стрелки показывают, что лучи попали в глаз. Обратные продолжения лучей (пунктирные прямые) дают возможность найти те точки на линейке, куда глаз проецирует эти лучи. Нетрудно сообразить, что в указанных направлениях хрусталик глаза собрал все лучи, отклонённые на один и тот же угол α . Если для этих лучей выполняется условия максимума (2.3), то все лучи, попадающие в глаз наблюдателя под этим углом, накладываясь, дадут на сетчатке глаза яркий максимум, который наблюдатель воспринимает как яркую полосу, расположенную в одной плоскости со щелью на расстоянии l_1 или l_2 по обе стороны от щели (см. рис. 2.2).

Расстояния l_1 и l_2 можно измерить по линейке, в которой прорезана щель, а расстояние L между щелью и дифракционной решёткой – по другой линейке, рас-

положенной параллельно лучу. По измеренным длинам можно найти синус угла отклонения, который равен отношению противолежащего катета к гипотенузе:

$$\sin \alpha = \frac{l}{\sqrt{L^2 + l^2}}. \quad (2.4)$$

При малых углах ($\alpha < 10^\circ$) синус практически равен тангенсу:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\langle l \rangle}{L}, \quad (2.5)$$

и при $l < 0,2L$ длину волны можно вычислять по формуле

$$\lambda \approx \frac{d \cdot \langle l \rangle}{kL}. \quad (2.6)$$

Здесь $\langle l \rangle = (l_1 + l_2)/2$ – среднее значение отклонений l_1 и l_2 , измеренные для соответствующего цвета.

Выполнение работы

1. Запишите в черновик значение периода d дифракционной решётки.
2. Определите цену деления линеек и запишите в черновик.
3. Установите дифракционную решётку на расстоянии L от щели (по указанию преподавателя). Запишите значение L в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№ п/п	Цвет	k	L , мм	l_1 , мм	l_2 , мм	$\langle l \rangle$, мм	λ , нм
1	Красный						
2	Зеленый						
3	Фиолетовый						
4	Красный						
5	Зеленый						
6	Фиолетовый						
4	Красный						
5	Зеленый						
6	Фиолетовый						
4	Красный						
5	Зеленый						
6	Фиолетовый						

4. Включите осветитель.
5. Глядя сквозь решётку на щель, измерьте отклонения l_1 и l_2 в спектре первого порядка ($k = 1$) для каждого из трёх цветов, запишите в табл. 2.1.
6. Повторите измерения по п. 4, ещё для трёх расстояний L между решёткой и щелью (значения L задаются преподавателем или лаборантом). Всего получится по 4 измерения для каждого цвета. Обратите внимание: в ячейках для L и k должно стоять только одно число, общее для трёх цветов!
7. Выключите все приборы.

8. Вычислите длину волны в метрах для любой строчки в таблице по Вашему выбору.

9. Представьте результаты измерений на подпись преподавателю. Получив подтверждающую подпись, наведите порядок на рабочем месте.

Анализ и обработка результатов измерений

1. Дома вычислите и запишите средние значения отклонений в каждой строчке таблицы.

2. По формуле (5) рассчитайте значения длины волны λ для каждой строки с *разумной* точностью и запишите в табл. 1.

ПРИМЕЧАНИЕ: расчёты вести только в системе СИ по правилам приближённых вычислений, округляя расчётные значения до **трёх значащих цифр**, и убирая нули в **порядок** числа.

3. Оформите статистическую обработку результатов по 4-м значениям λ для каждого цвета в виде 3 стандартных **таблиц обработки результатов измерений** (прил. 1, табл. П1.2).

4. Сравните полученные средние значения с табличными значениями длин волн оптического диапазона (прил. 2, табл. П2.1).

5. Сформулируйте и напишите вывод, обобщающий полученные Вами результаты измерений, расчётов и сравнений.

Контрольные вопросы

1. Назовите составные части лабораторной установки и их назначение.
2. Какие величины измеряются в данной работе непосредственно? Какие вычисляются?
3. В чём заключается явление дифракции?
4. Что представляет собой дифракционная решётка? Для чего она используется?
5. Почему белый свет, пройдя через дифракционную решётку, образует спектр? В каком порядке располагаются цвета в этом спектре?
6. В каких пределах лежат длины волн видимого света? Как называют излучение, длины волн которого меньше (больше), чем у видимого света?
7. Выведите и объясните расчётную формулу для вычисления длины волны.

Лабораторная работа № 3.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОЭЛЕМЕНТА

Цель работы: снять кривую спектральной чувствительности фотоэлемента и определить по ней полосу пропускания; оценить зависимость освещённости катода фотоэлемента от расстояния до источника света.

Оборудование: оптическая скамья с источником света, набором светофильтров и фотоэлементом, измерительный модуль с блоком питания осветителя.

Краткая теория

Из школьного курса физики вам известно **явление фотоэффекта**, которое заключается в том, что при освещении металлической пластинки из неё могут вырываться свободные электроны, которые получили название фотоэлектронов. Для наблюдения и практического использования фотоэффекта промышленность выпускает фотоэлементы различных типов. **Вакуумный фотоэлемент** представляет собой стеклянную колбу, на часть внутренней поверхности которой напылён тонкий слой металла – **катод**, который испускает электроны под действием квантов света. В центре колбы устанавливается приёмник электронов – **анод**. Чтобы фотоэлектроны беспрепятственно достигали анода, воздух из колбы откачивается.

Если к аноду подключить положительный полюс источника тока, а к катоду – отрицательный, то испущенные катодом фотоэлектроны будут притягиваться к аноду, и по цепи пойдёт электрический ток, который принято называть **фототок**. Так как фототок очень мал, то для его измерения используется микроамперметр ($1 \text{ мкА} = 10^{-6} \text{ А}$). Величина фототока $I_{\text{ф}}$ прямо пропорциональна световому потоку Φ , поэтому фотоэлементы используются для измерения количества света.

Величина фототока зависит также от длины волны излучения, освещающего катод фотоэлемента. Как и любой приёмник света, фотоэлемент не одинаково реагирует на разные длины волн, то есть имеет свою **спектральную чувствительность**. Если поддерживать постоянную освещённость катода, то, изменяя длину волны и измеряя соответствующую величину фототока, можно определить спектральную чувствительность фотоэлемента.

Если же изменять световой поток, освещающий катод фотоэлемента, но сохранять при этом цвет излучения, то измеренный фототок будет характеризовать количество световой энергии, дошедшей до катода фотоэлемента.

Описание установки

Определить, на какие именно части спектра сильнее всего реагирует фотоэлемент, можно с помощью собранной для этого специальной установки, состоящей из источника света, фотоэлемента и поворотной шайбы с набором светофильтров, установленных на оптической скамье (рис. 3.1).

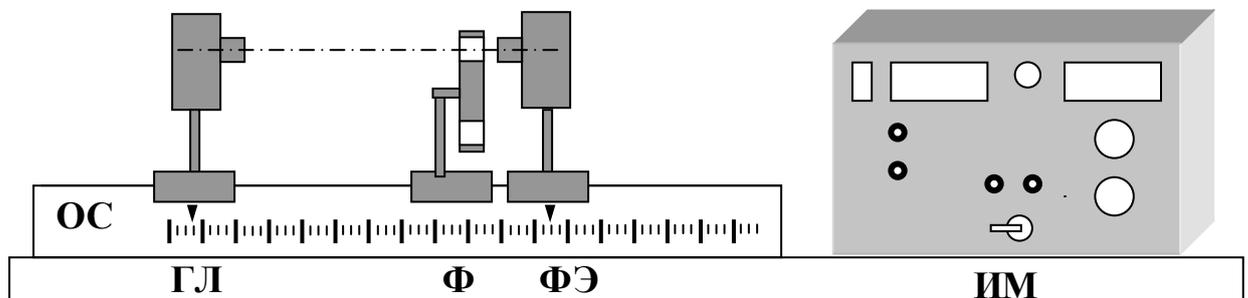


Рис. 3.1. ГЛ – галогеновая лампа; Ф – светофильтры; ФЭ – фотоэлемент; ОС – оптическая скамья; ИМ – измерительный модуль

Лабораторная установка имеет семь светофильтров – по числу основных цветов спектра. На каждом светофильтре проставлена та длина волны, которую он

пропускает. Для выполнения измерений в состав лабораторной установки входит измерительный модуль, обеспечивающий подачу и измерение напряжения на фотоэлементе в пределах от -5 до $+20$ В, измерение силы тока от 0 до $9,99$ мкА, а также электропитание источника света – галогеновой лампы.

Выполнение работы

Чтобы построить **кривую спектральной чувствительности**, нужно проделать следующие действия:

1. Ознакомиться с установкой, стоящей на рабочем столе, найти составляющие её части – источник света, набор светофильтров, фотоэлемент, измерительный модуль. Разобраться с его переключателями и регуляторами.

2. Проставить в тех колонках табл. 3.1, куда вы будите заносить фототок, единицы его измерения.

3. Включить с разрешения преподавателя или лаборанта источник света и измерительный прибор. Установить напряжение на фотоэлементе, близкое к максимальному, в пределах $15 \dots 19$ В и не изменять его до конца измерений.

4. Измерить и занести в табл. 3.1 расстояние L_1 между фотоэлементом и источником света. Поставить **красный** светофильтр и записать показание микроамперметра, т.е. значение фототока, соответствующее красному цвету. Также запишите в таблицу длину волны, указанную на оправе светофильтра.

5. Повернуть диск со светофильтрами на **оранжевый** цвет, и повторить измерения по пункту 3.

6. Поворачивая светофильтр, провести измерения со всеми цветами, заносая в таблицу соответствующее каждому цвету значение фототока, цвет и длину волны.

7. Провести те же измерения по второму кругу, тогда каждому цвету будет соответствовать по два значения фототока.

8. Увеличить расстояние между источником света и фотоэлементом до L_2 (приблизительно в 2 раза) и повторить измерения по пунктам 4, 5, 6 и 7. Все измеренные величины занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

№ п/п	Цвет	λ , нм	$L_1 = \dots$			$L_2 = \dots$			$\frac{\langle I_1 \rangle}{\langle I_2 \rangle}$
			I_1	I_2	$\langle I_1 \rangle$	I_3	I_4	$\langle I_2 \rangle$	
1	Красный								
2	Оранжевый								
3	Жёлтый								
4	Зеленый								
5	Голубой								
6	Синий								
7	Фиолетовый								

Выключите все приборы, покажите результаты измерений руководителю работ или преподавателю. Получив у него подтверждающую подпись, наведите порядок на своём рабочем месте.

Анализ и обработка результатов измерений

1. Посчитайте для каждого цвета среднее значения фототока $\langle I_1 \rangle$ и $\langle I_2 \rangle$, записать их в соответствующие колонки таблицы.

2. Вычислите отношение средних значений фототока для каждого цвета, запишите в последний столбец табл. 3.1.

3. Постройте на миллиметровой бумаге график зависимости среднего значения фототока от длины световой волны. Таких графиков будет два: для расстояний L_1 и L_2

Примечание. Строить оба графика следует на одном листе миллиметровой бумаги в единой системе координат. Вам понадобится квадратный листок бумаги со стороной около 150 мм. Перед тем, как наносить точки, нужно провести оси координат, нанеся на них масштаб. По оси абсцисс откладывается длина волны, от 400 до 700 нм. На оси ординат отмечаются числа масштаба равномерно от 0 до максимального значения.

4. Определите полосу пропускания фотоэлемента на уровне 50%

5. Сравните построенные графики с кривой видности среднего глаза, построив эту кривую на том же графике. Ось ординат для кривой видности проведите с правой стороны листа и нанесите масштаб от 0 до 1 с равномерным шагом, равным 0,1. Высота графика видности должна быть не менее 10 см. Данные для построения возьмите в Приложении 2.

6. Вычислите отношение L_2/L_1 , сравните его с отношением фототоков из последней колонки табл. 3.1. Что изменилось больше – расстояние между лампой и фотоэлементом, или световой поток, дошедший до фотоэлемента?

7. Сформулируйте вывод и запишите его в конце отчёта.

Контрольные вопросы

1. Назовите составные части лабораторной установки и их назначение.

2. Какие величины измеряются в данной работе непосредственно? Какие вычисляются?

3. В чём заключается явление фотоэффекта? Для каких целей может быть использован фотоэффект?

4. Что представляет собой вакуумный фотоэлемент?

5. Как образуется фототок? От какой характеристики света зависит его величина?

6. Кривая видности – что это такое? При какой длине волны (и при каком цвете) чувствительность глаза максимальна?

7. Что называют полосой пропускания? Сравните ширину полос пропускания на уровнях 70 %, 50 %, 30 %.

8. Как зависят фототок и освещённость катода фотоэлемента от расстояния между лампой и фотоэлементом?

Лабораторная работа № 4.

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЯРКОСТИ И ЦВЕТА НАГРЕТОГО ТЕЛА ОТ ЕГО ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: научиться измерять температуру тела по его яркости, определить зависимость мощности и цвета излучения от температуры.

Оборудование: источник излучения (лампа накаливания), пирометр, амперметр, вольтметр, реостат, источник питания.

Краткая теория

Любое нагретое тело излучает энергию в виде электромагнитных волн. В излучении нагретого *твёрдого тела* присутствуют любые частоты и, следовательно, всевозможные длины волн. Распределение энергии по длинам волн, т.е. **спектр** излучения в этом случае будет непрерывным. При увеличении температуры тела возрастает полная энергия, излучаемая телом, и спектр излучения сдвигается в сторону более коротких волн.

Энергетическими характеристиками излучения являются поток Φ излучения и энергетическая светимость R_s , которые пропорциональны излучаемой энергии.

Потоком излучения называют полную энергию, излучаемую всей поверхностью тела за единицу времени:

$$\Phi = \frac{W}{t}, \quad (4.1)$$

где W – полная энергия, излучаемая телом за время t . Нетрудно заметить, что поток – это по сути мощность излучения.

Энергетическая светимость – это поток, излучаемый телом с единицы площади его поверхности:

$$R_s = \frac{\Phi}{S}. \quad (4.2)$$

Яркость источника света пропорциональна энергетической светимости. Она определяется той частью энергии, которая излучается в световом диапазоне, то есть в интервале длин волн от 380 до 760 нм. При температурах до 2000 К подавляющая часть всей излучённой энергии приходится на инфракрасную область спектра, и воспринимается человеком как ощущение тепла. Световая энергия составляет доли процента от всей излучаемой телом энергии. Чем выше температура, тем большая часть энергии излучается в видимом и ультрафиолетовом диапазонах оптического спектра.

Излучая, тело теряет энергию, и если её не пополнять, то температура тела понижается. Чтобы поддерживать температуру постоянной, нужно непрерывно

подводить к телу энергию, равную энергии излучения. В нашем случае источником излучения будет вольфрамовая спираль лампы накаливания, которая разогревается проходящим по ней электрическим током. Мощность P , потребляемая лампой от источника электропитания, пропорциональна силе I тока и напряжению U , приложенному к концам спирали:

$$P = IU. \quad (4.3)$$

Полагая, что поток излучения Φ равен электрической мощности P и измеряя температуру спирали лампы, можно определить, как зависит поток излучения от температуры излучающего тела. Чтобы получить правильную зависимость, температуру T нужно выражать в единицах СИ – кельвинах (К). (Напомним, что абсолютная температура на 273 градуса больше температуры по Цельсию).

Поскольку площадь излучающей поверхности при нагревании практически не изменяется, то зависимость энергетической светимости и яркости от температуры спирали будет такая же, как и зависимость $\Phi(T)$. Таким образом, светимость лампы накаливания можно рассчитать, разделив мощность (4.3) на площадь S излучающей поверхности – спирали лампы накаливания.

При изменении температуры меняется не только яркость, но и цвет излучения, так как изменяется распределение энергии по длинам волн. Чем выше температура, тем больше в спектре коротких волн. При температуре 800–900 °С цвет темно-красный, затем, по мере нагревания, цвет становится оранжевым, жёлтым, белым... за счёт увеличения доли коротких волн в излучении. Эти изменения можно наблюдать, увеличивая подводимую к нагреваемому телу энергию, т.е. увеличивая напряжение и силу тока.

Описание установки

Лабораторная установка размещается на рабочем столе и включает в себя источник питания, реостат, лампу накаливания, вольтметр, амперметр и оптический пирометр. Для проведения измерений собирается простая электрическая схема (рис. 4.1). Ток от источника постоянного тока ИП проходит через реостат R , лампу, амперметр A , и возвращается в источник. Сила тока I регулируется изменением сопротивления реостата и измеряется амперметром. Напряжение U на зажимах лампы измеряется вольтметром V .

Температуру светящегося тела определяют с помощью яркостного оптического **пирометра** – прибора, который даёт возможность измерять температуру тела без непосредственного контакта с ним – по яркости светового излучения. В пирометре имеется вольфрамовая прямая проволока – нить, которая видна в окуляре пирометра. К нити подводится ток, при пропускании которого нить раскаляется. Яркость свечения нити пирометра можно менять, изменяя в ней силу тока. Это достигается поворотом

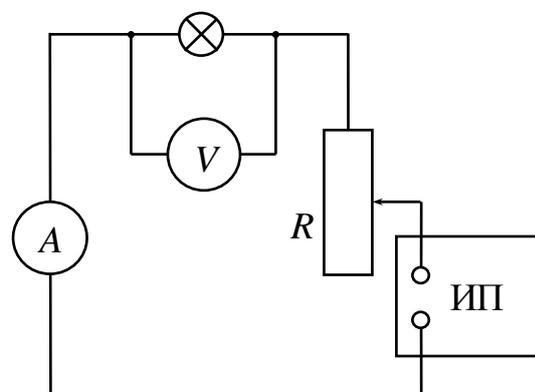


Рис. 4.1

барабана со шкалой, на которой проставлена соответствующая данному накалу температура.

Для измерения температуры пирометр наводят на светящееся тело так, чтобы изображение нити накладывалось на изображение тела (в нашем случае это спираль лампы накаливания), и вращением барабана добиваются совпадения яркости нити с яркостью тела. В первом приближении можно считать, что если равны яркости, то равны и температуры.

Чтобы повысить точность измерений, сравнение яркостей производят при определённой длине волны $\lambda \approx 660$ нм, что соответствует красному цвету. Для этого в поле зрения вводится красный светофильтр.

Яркостный оптический пирометр называют также пирометром с исчезающей нитью. Такое название связано с процедурой измерения. После наложения изображений нити и спирали лампы изменяют накал нити пирометра так, чтобы нить стала невидимой (как бы исчезла) на фоне светящейся спирали (рис. 4.2). Если яркость нити пирометра *меньше* яркости спирали, то нить видна на фоне спирали полностью, как *тёмная* линия (рис. 4.2, б), и яркость нити следует увеличить. Если же нить видна вся как *светлая* линия, то яркость нити нужно *уменьшить* (рис. 4.2, в). Так как температура спирали на краях несколько меньше, чем в её середине, то нужно добиваться «исчезновения» участка нити именно в средней части спирали, как это показано на рис. 4.2, а.

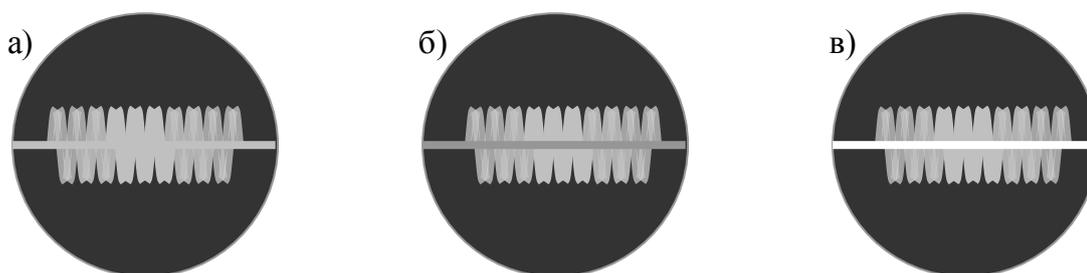


Рис. 4.2

Выполнение работы

1. Определите и запишите в черновик цену деления каждого прибора – амперметра, вольтметра и пирометра.
2. Запишите значение площади спирали лампы (схема соединений и площадь спирали приведены в инструкции на рабочем месте).
3. Соберите электрическую цепь (см. рис. 4.1) и предъявите на проверку лаборанту или преподавателю. Движок реостата – в среднем положении.
4. С разрешения преподавателя включите источник питания в сеть 220 В, при этом амперметр должен показать небольшой ток.
5. Уменьшая сопротивление реостата, увеличивайте силу тока в лампе до тех пор, пока не появится тёмно-красное свечение в середине спирали лампы.

б. Увеличивая силу тока реостатом, проследите, как изменяются при этом напряжение на лампе, яркость и цвет спирали. Верните движок реостата в исходное положение (см. п. 5). Свои впечатления запишите в черновик.

Затем приступайте к измерению температуры.

7. Вращая шкалу температур, установите температуру по шкале пирометра около 900 °С. (Переключатель режимов пирометра в положении «1»).

8. Посмотрите в окуляр. Включите питание нити пирометра, нажав клавишу на его рукоятке. В поле зрения должна появиться яркая горизонтальная полоска – изображение светящейся нити, которая становится чёрной, если отпустить клавишу.

9. Вращая оправу окуляра, получите резкое изображение нити пирометра, затем введите красный светофильтр с помощью рифлёного выступа на окуляре.

10. Глядя в окуляр пирометра, наведите его так, чтобы в поле зрения оказалась спираль лампы, и горизонтальная светящаяся нить проходила по середине спирали (см. рис. 4.2).

11. Установите напряжение, при котором начнёт излучать не только середина спирали, но и её концы. Снимите показания вольтметра и амперметра, запишите их в табл. 4.1.

12. Глядя в окуляр, вращением шкалы температур добейтесь, чтобы средняя часть светящейся нити пирометра «исчезла» на фоне раскалённой спирали лампы, и запишите в табл. 4.1 значение температуры (по 1-й шкале) в ту же строку таблицы, где записаны показания вольтметра и амперметра. В колонку «Цвет» запишите наблюдаемый Вами напрямую (не через пирометр) цвет спирали лампы при измеренной температуре.

Таблица 4.1

№ п/п	U , В	I , А	Показания пирометра, °С	Цвет	T , К	P , Вт	R_s , Вт/м ²
1							
2							
...							

13. Увеличивая реостатом напряжение ступенями по 0,5...1,0 В, повторите измерения по пп. 11, 12 ещё не менее 4 раз, записывая показания приборов в ту же таблицу. Итого в таблице будет 5–6 строк измерений.

Отключите электропитание, покажите результаты измерений руководителю работ. Получив у него подтверждающую подпись, наведите порядок на своём рабочем месте.

Анализ и обработка результатов измерений

1. Вычислите и запишите в табл. 4.1 соответствующие каждому напряжению мощность P и светимость R_s лампочки, а также абсолютную температуру T .

2. Постройте график зависимости светимости R_s от температуры.

ПРИМЕЧАНИЕ. Отсчёт масштабов по осям графика начинать **не с нуля!** Начальная точка графика должна быть близка к минимальным значениям $R_э$ (по оси ординат) и T (по оси абсцисс). Размер миллиметровки 16×20 см².

3. Определите, во сколько раз отличаются абсолютные температуры и энергетические светимости при наименьшем и наибольшем значениях напряжения в проведённых Вами измерениях. Для этого нужно разделить T_{\max} на T_{\min} , и соответственно $(R_э)_{\max}$ $(R_э)_{\min}$. Какая из этих величин изменяется больше: температура, или светимость?

4. Запишите в выводе, как изменяются яркость, цвет и спектральный состав (длины волн) с увеличением температуры.

Контрольные вопросы

1. Какие приборы используются в данной работе?
2. Назовите физические величины, непосредственно измеряемые в работе.
3. Как по измеренным значениям найти поток излучения и светимость?
4. Что называется потоком излучения и энергетической светимостью? Назовите единицы измерения этих величин, а также светового потока и силы света.
5. В каких единицах измеряются энергия, мощность, температура, время, сила тока, электрическое напряжение?
6. Опишите назначение, устройство и принцип работы пирометра.
7. Какие световые характеристики излучения нагретого тела изменяются при увеличении его температуры? Как изменяются?
8. В чём различие потока излучения и светового потока?

Лабораторная работа № 5. ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Цель работы: познакомиться со способами получения и наблюдения поляризованного света, проверить закон Малюса, рассмотреть изменения цвета, интенсивности и поляризации света при его прохождении через оптически активную среду.

Оборудование: оптическая скамья, источник света, два поляроида в оправках, фотоэлемент, источник питания, микроамперметр.

Краткая теория

Прежде, чем приступить к изучению теории этой работы, ещё раз внимательно прочтите параграф «Поперечность световых волн. Поляризация света» в данном пособии (с. 13–14). Вам после этого будут более понятны рассматриваемые ниже явления и понятия, которые обусловлены поперечностью световых волн. Теперь несколько дополним эти первоначальные представления.

На рис. 5.1 изображены векторы напряжённостей в плоской электромагнитной волне, распространяющейся вдоль оси x . Напряжённость \vec{E} электрического поля колеблется, т. е. изменяется в пространстве и во времени, оставаясь в одной и той же вертикальной плоскости K , которая называется **плоскостью колебаний** (см. рис. 8 на стр. 13). Под прямым углом к ней расположена **плоскость поляризации** Π , в которой колеблется напряжённость \vec{H} магнитного поля. Направление распространения световой волны перпендикулярно векторам напряжённостей, то есть скорость \vec{c} света направлена под углом 90° к векторам напряжённостей \vec{E} и \vec{H} .

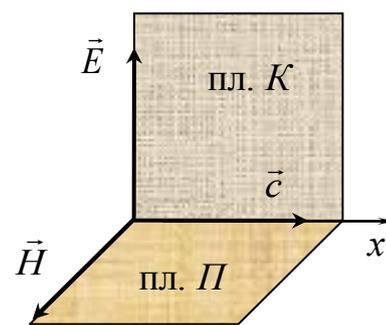


Рис. 5.1

Напомним, что в *естественном свете* плоскостей колебаний бесконечное множество, то есть электрическое поле и магнитное поле могут изменяться в любых плоскостях, но оставаясь при этом перпендикулярными скорости распространения, то есть лучу. Попадая на вещество, световая волна своим электрическим полем вызывает смещение электронов в атомах, приводит их в колебательное движение, и возбуждённый таким образом атом излучает такую же плоскую поперечную световую волну.

Если в веществе составляющие его атомы или молекулы расположены симметрично, и электрические свойства вещества одинаковы по всем направлениям, то возможно возникновение поперечных колебаний в любых плоскостях, и естественный свет пройдёт через такое вещество без изменений, т.е. останется естественным. Но строение некоторых веществ таково, что в них могут распространяться лишь те световые волны, в которых колебания вектора \vec{E} происходят только в одной плоскости. В этом случае свет, прошедший через вещество, будет отличаться от света на входе в вещество: плоскостей колебаний в нём будет уже не бесконечное множество, а только одна. Такой свет называется *плоско* или *линейно поляризованным*. Вещества и устройства, вызывающие поляризацию световой волны, называют *поляроидами*. Прямая, лежащая в плоскости поляроида и совпадающая с плоскостью колебаний вектора \vec{E} (см. рис. 5.1, плоскость K) называется *осью поляроида*. Поляроиды, или поляризационные фильтры предназначены как для получения поляризованного света из естественного, так и для анализа поляризованного света.

Глаз человека не отличает естественный свет от поляризованного, в отличие от глаз некоторых насекомых, например, мухи, или пчелы. Поэтому приходится пользоваться специальными устройствами типа нашей лабораторной установки, описанной ниже.

Описание установки

Принципиальная схема лабораторной установки для наблюдения и изучения поляризации приведена на рис. 5.2. Естественный свет от лампы проходит после-

довательно через два поляроида и попадает на фотоэлемент, который преобразует энергию света в электрический ток, величина которого измеряется с помощью микроамперметра.

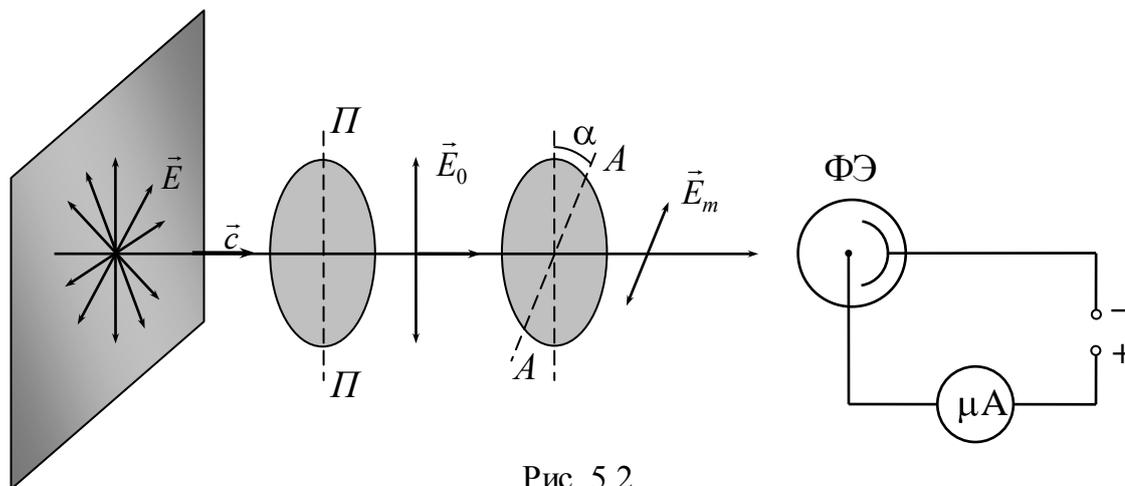


Рис. 5.2

Первый поляроид превращает естественный свет в поляризованный, т. е. поляризует свет, а второй поляроид его анализирует. Соответственно, первый поляроид называют **поляризатором**, а второй – *анализатором*. Их оси помечены на рисунке пунктиром и обозначены $ПП$ и $АА$.

На воображаемой плоскости в левой части рисунка изображено множество векторов \vec{E} в неполяризованном луче света, идущего от источника. Все они перпендикулярны лучу, направление которого совпадает с направлением вектора \vec{c} . (Векторы напряжённости магнитного поля здесь, как принято, не показаны, поскольку поведение их полностью аналогично). Вектор напряжённости в световой волне, прошедшей через поляризатор, обозначенный на рис. 5.2. как \vec{E}_0 , колеблется в вертикальной плоскости, и параллелен оси $ПП$ поляризатора. Свет, прошедший затем через анализатор, остаётся плоскополяризованным, но в нём плоскость колебаний теперь параллельна оси анализатора $АА$.

На рис. 5.3 представлен вид на поляроиды со стороны фотоэлемента, то есть вдоль луча. Как следует из рисунка, амплитуда колебаний вектора напряжённости \vec{E}_m в свете, прошедшем через анализатор, прямо пропорциональна косинусу угла α между осями $ПП$ и $АА$:

$$E_m = E_0 \cos \alpha. \quad (5.1)$$

Перпендикулярная составляющая \vec{E}' полностью поглощается в поляроиде. Энергия световой волны, как известно, прямо пропорциональна квадрату амплитуды, поэтому интенсивность I плоскополяризованного света, прошедшего через анализатор, прямо пропорциональна квадрату косинуса угла α между осями анализатора и поляризатора (см. рис. 5.2) и интенсивности I_0 света, прошедшего через поляризатор:

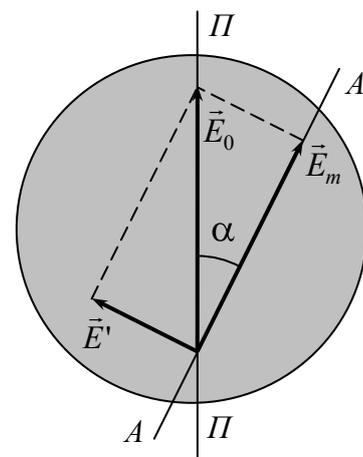


Рис. 5.3

$$I = I_0 \cos^2 \alpha. \quad (5.2)$$

Соотношение (5.2) называется **законом Малюса**.

Если оси *ПП* и *АА* параллельны ($\alpha = 0$ или 180° , $\cos \alpha = \pm 1$), то поляризованный поляризатором свет полностью пропускается анализатором. Если же анализатор повернуть вокруг луча так, чтобы его ось была перпендикулярна оси поляризатора ($\alpha = 90^\circ$, $\cos \alpha = 0$), то поляризованный луч через анализатор не пройдет совсем. Ось анализатора может быть повернута вокруг луча на любой угол α по отношению к оси поляризатора. Для измерения этого угла на анализаторе установлен лимб с делениями от 0 до 360° .

Свет, прошедший через анализатор, попадает на фотоэлемент и вызывает появление в измерительной цепи (см. рис. 5.2.) фототока, величина которого прямо пропорциональна *интенсивности света* I , прошедшего через анализатор. Значит, по изменению фототока можно судить об изменении интенсивности света, дошедшего до фотоэлемента.

Выполнение работы

Задание 1. Проверка закона Малюса

Чтобы проверить закон Малюса, нужно измерить силу тока в цепи фотоэлемента при разных углах α , и по данным этих измерений построить график зависимости величины фототока i от $\cos^2 \alpha$. Если график окажется прямой линией, то интенсивность прямо пропорциональна квадрату косинуса, и, следовательно, удовлетворяет уравнению (5.2).

Измерения нужно проводить в следующем порядке.

1. Ознакомьтесь с лабораторной установкой, разберитесь с местонахождением и назначением каждого элемента на рабочем столе. Оба поляроида могут поворачиваться от руки вокруг оси светового пучка. Для измерения угла поворота анализатора на нём закреплён лимб с указателем – **угломер**. На поляризаторе угломера нет.

2. Определите цену деления микроамперметра и угломера, запишите эти значения в свой протокол наблюдений (черновик).

3. С разрешения преподавателя включите источник света. Поворачивая анализатор, посмотрите, как изменяются яркость и цвет прошедшего света. Опишите это в своём черновике.

4. Снимите поляризатор и сделайте аналогичные действия. Опишите, как в этом случае изменяется прошедший свет при вращении анализатора.

5. Включите источник питания цепи фотоэлемента. Убедитесь, что микроамперметр показывает ток, который изменяется при перекрывании пучка света (например, рукой).

6. Установите угломер на ноль.

7. Вращая **поляризатор**, добейтесь наибольшего показания микроамперметра. При этом оси *ПП* и *АА* параллельны друг другу, угол α (см. рис. 5.2) равен нулю. Запишите показания микроамперметра в табл. 5.1.

Таблица 5.1

$\alpha, ^\circ$	0	10	20	30		340	350	360
$i, \text{мкА}$								

8. Поверните анализатор на отметку 10° , запишите показания микроамперметра в соответствующую ячейку табл. 5.1.

9. Повторите измерение, увеличив угол до 20° . Продолжайте измерения, увеличивая угол шагами по 10° , пока анализатор не совершит полный оборот. Итого будет 37 измерений.

10. Выключите фонарь и источник питания цепи фотоэлемента.

11. Перенесите полученные значения фототока из табл. 5.1 в табл. 5.2.

ПРИМЕЧАНИЕ. Заполнять ячейки последней таблицы нужно в следующем порядке: в колонку i_1 – показания от 0 до 90° , в колонку i_2 – от 90 до 180° , **начиная** заполнять этот столбец **снизу**, в колонку i_3 – от 180 до 270° , и так далее до 360° (см. направляющие стрелки в таблице 5.2).

Таблица 5.2

$\alpha, ^\circ$	i_1	i_2	i_3	i_4	$\langle i \rangle$	$\cos^2 \alpha$
0						
10						
20						
30						
40						
50						
60						
70						
80						
90						

Анализ и обработка результатов измерений

1. Вычислите и запишите в колонку $\langle i \rangle$ среднее значение тока в каждой строке, а в последнюю колонку табл. 5.2 – квадраты косинусов соответствующих углов.
2. Постройте график зависимости $\langle i \rangle$ от $\cos^2 \alpha$, оцените по его виду, получилось ли соответствие закону Малюса.

Сформулируйте и запишите общий вывод, отметив следующие моменты:

- как и почему изменяется интенсивность после анализатора при его вращении в случаях: 1) с поляризатором; 2) без поляризатора;
- при каких углах прошедший свет имеет максимальную интенсивность, при каких – минимальную;
- подтвердился ли закон Малюса в Ваших измерениях и почему.

Задание 2. Наблюдение изменений, происходящих со светом при его прохождении через оптически активную среду

Установка, на которой вы выполняли первое задание, может быть использована и для выполнения второго задания, связанного с появлением на экране красивой цветной картины. Она появляется в том случае, если между поляризатором и анализатором поместить вещество, обладающее **оптической анизотропией**, то есть неодинаковостью оптических свойств по разным направлениям.

Анизотропией обладают вещества, в основном кристаллические, в которых атомы расположены по разным направлениям неодинаково. Известны кристаллы, в которых анизотропия оптических свойств наблюдается по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Если вещество, обладающее такими свойствами, прозрачно, то проходящий через него луч делится на два луча, которые поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Из-за различия показателя преломления по двум различным направлениям эти два луча, проходя через кристалл, приобретают оптическую разность хода $\Delta_{\text{опт.}} = l(n_2 - n_1)$ (см. формулу (9) на стр. 11). Однако эти лучи, несмотря на постоянную разность хода, не смогут интерферировать, так колебания в них происходят в **разных плоскостях**. Чтобы наблюдать интерференционную картину, нужно совместить их плоскости колебаний, пропуская свет через анализатор.

Возможно появление анизотропии и в **изотропных** (однородных) веществах в случае их деформации или особенностей изготовления. Такими свойствами обладают некоторые (не все!) полиэтиленовые пленки, целлофан, оргстекло. Если такую плёнку поместить между поляризатором и анализатором, то световые волны изменятся так, что на экране вследствие интерференции образуется тот или иной цвет. Объяснить это можно, рассмотрев три этапа преобразования света (рис. 5.4):

- поляризатор преобразует естественный свет в поляризованный в одной плоскости;
- в плёнке свет разделяется на два луча, поляризованные во взаимно перпендикулярных плоскостях;
- анализатор пропускает часть света от обоих лучей, совмещая их плоскости колебаний.

В результате после анализатора распространяются две когерентные волны, в которых колебания происходят в **одной плоскости**, которые и дают интерференционную картину, цвет которой зависит от оптической разности хода.

При повороте плёнки вокруг луча условия интерференции изменяются, соответственно должен измениться и цвет экрана. Из-за неоднородности пленки по толщине экран может быть окрашен неравномерно (пятнами).

Поскольку наложение лучей происходит в анализаторе, ориентация его оси тоже влияет на цвет, возникающий на экране, поэтому наблюдать смену цвета при вращении плёнки следует дважды, при двух разных взаимных ориентациях осей поляроидов. Интересную картину можно наблюдать при одновременном вращении плёнки и анализатора. Исходя из вышеизложенного, рекомендуется выполнять второе задание в три этапа.

В первом случае оси поляризатора и анализатора устанавливают **параллельно** друг другу, и поворачивая плёнку, наблюдают, как изменяется цвет на экране. Во **втором случае** эти же явления наблюдают при **перпендикулярных** осях анализатора и поляризатора. И, наконец, в **третьем случае** следует вращать анализатор и пленку одновременно.

Действия во 2-м задании нужно выполнять в следующем порядке.

1. Опустите круглый экран, закреплённый на обойме фотоэлемента.
2. Включите фонарь, и, вращая анализатор, установите по его угломеру угол $\alpha = 0$. При этом оси поляризатора станут параллельными, а освещённость экрана – максимальной.
3. Вставьте слайд с пленкой в держатель, расположенный между поляризатором и анализатором. Запишите номер слайда в табл. 5.3. Указатель на шкале держателя установите на ноль.
4. Определите название цвета, который Вы наблюдаете на экране, сравнивая его с цветовой **палитрой**, лежащей на рабочем столе, и запишите это название в соответствующую ячейку табл. 5.3 в строчке, обозначенной $P \uparrow \uparrow A$.
5. Повторите действия по п. 4. при других углах, указанных в табл. 5.3.
6. Возьмите слайд с другим номером, и повторите наблюдения по пунктам 3, 4 и 5, записывая названия наблюдаемых цветов в соответствующие ячейки таблицы.

Таблица 5.3

Цвет экрана при разных углах держателя слайдов

Угол держателя		0	45°	90°	135°	180°
Слайд № ...	$P \uparrow \uparrow A$					
	$P \perp A$					
Слайд № ...	$P \uparrow \uparrow A$					
	$P \perp A$					

Для выполнения 2-й части задания 2 повторите наблюдения для случая, когда ось анализатора перпендикулярна оси поляризатора. Для этого поверните анализатор на 90° и проделайте действия по пунктам 3–6, записывая названия цветов в те строки той же таблицы, где $P \perp A$.

Для выполнения третьей части задания 2 нужно одновременно поворачивать анализатор и держатель со слайдом, причём в противоположных направлениях, наблюдая за происходящими на экране изменениями. Проделайте это и опишите наблюдаемую Вами картину.

Явления, которые вы наблюдали, были открыты в 1811 году и получили название **хроматической поляризации** [2]. Они служат основой создания наиболее

чувствительного метода определения оптической однородности вещества (постоянства показателя преломления по разным направлениям).

В обобщающем выводе отчёта по этой лабораторной работе опишите, как влияет внесение плёнки между скрещенными под прямым углом поляроидами на интенсивность и цвет проходящего света, как изменяется цвет при повороте анализатора на 90° , и что наблюдается при одновременном вращении плёнки и анализатора.

Контрольные вопросы

1. Назовите составные части лабораторной установки и их назначение.
2. Назовите физические величины, непосредственно измеряемые в работе.
3. Какова природа световых волн?
4. Назовите характеристики световой волны и дайте их определения.
5. Какая волна называется поперечной? Каковы её особенности?
6. Чем естественный свет отличается от поляризованного?
7. Что такое поляроид? Что называется его осью?
8. Как можно обнаружить, что свет поляризован?
9. Сформулируйте закон Малюса.
10. Что такое анизотропия? В каких веществах она имеет место?
12. Что происходит в прозрачных анизотропных веществах при прохождении через них света?
13. Что вы должны увидеть на экране, поместив между поляризатором и анализатором плёнку?
14. Зависит ли наблюдаемая картина от взаимной ориентации осей поляризатора и анализатора?

Лабораторная работа № 6.

НАБЛЮДЕНИЕ СПЛОШНОГО И ЛИНЕЙЧАТОГО СПЕКТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИН ВОЛН СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Цель работы: ознакомиться с принципами работы спектроскопов, проградуировать монохроматор, определить газ по длинам волн его спектра.

Оборудование: монохроматор, лампа дневного света, пусковое устройство с газоразрядной трубкой.

Краткая теория

Спектроскоп – спектральный прибор для визуального наблюдения спектров излучения, состоящий из устройства для получения пучков параллельных лучей и из диспергирующего элемента, который распределяет энергию излучения по длинам волн. В качестве такого элемента может быть использована дифракционная решётка или призма.

В основе работы призмных спектрометров лежит явление *дисперсии*, подробно описанное в нашем учебном пособии на стр. 6–7. Основной частью этих приборов является призма, действие которой показано на рис. 6.1.

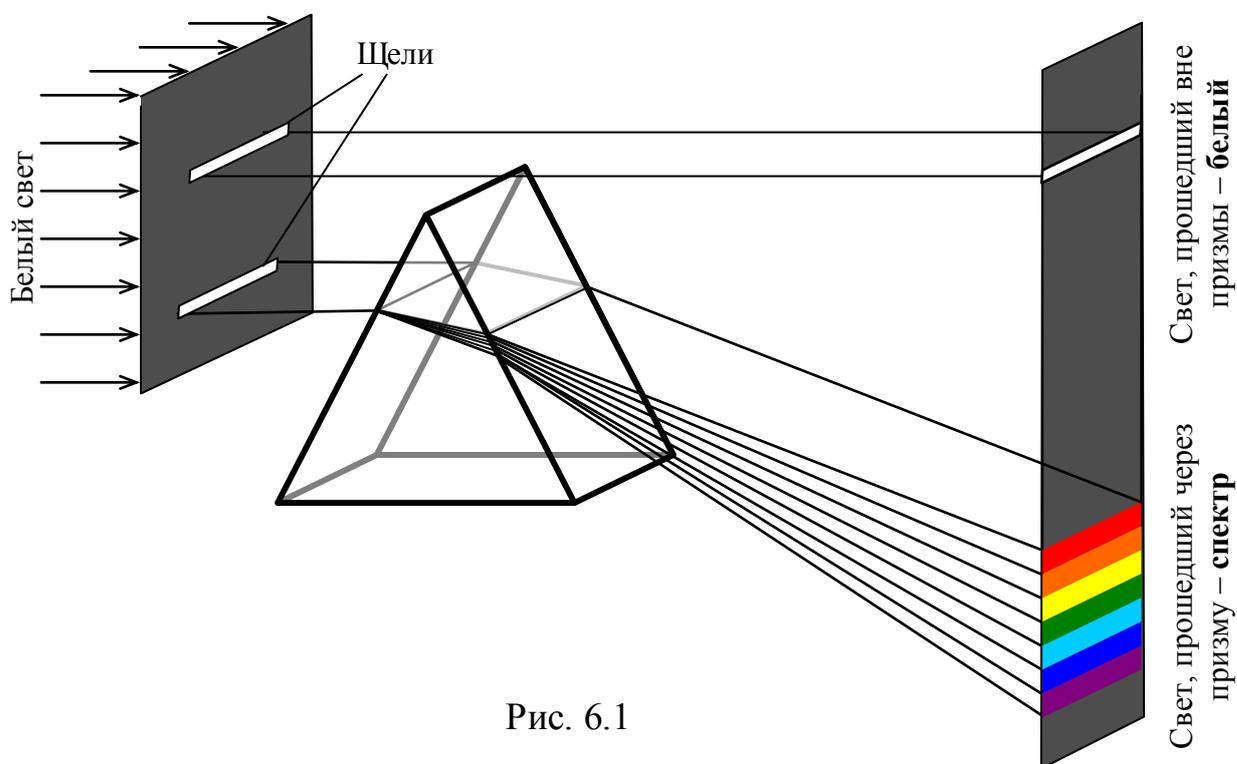


Рис. 6.1

Если в тёмную комнату пропустить белый свет через две щели (достаточно широкие, чтобы пренебречь явлением дифракции), то напротив щелей на экране высветятся две белые полосы. Одна из них, образованная светом, прошедшим через верхнюю щель, показана на экране. Пучок света от нижней щели проходит через трёхгранную призму. При прохождении света через призму волны, имеющие разную частоту (длину волны), отклоняются на разные углы, и прошедший через призму свет разлагается в *спектр*. На рис. 6.1 спектр изображён в виде резко отличающихся по цвету полосок, но в реальном спектре белого света цвет изменяется плавно, в чём Вы сможете убедиться, наблюдая спектр лампы дневного света.

Это явление впервые описал Исаак Ньютон в 1676 г., когда он с помощью трёхгранной призмы разложил белый солнечный свет на цветовой спектр. Ньютон ставил свой опыт следующим образом (рис. 6.1). Солнечный свет пропускался через узкую щель и падал на призму. В призме луч белого цвета расслаивался на отдельные спектральные цвета. Разложенный таким образом, он направлялся затем на экран, где возникало изображение спектра. Непрерывная цветная лента начиналась с красного цвета и через оранжевый, жёлтый, зелёный, синий кончалась фиолетовым. Описанный выше непрерывный спектр носит название **сплошного спектра**. Он появляется при разложении света от нагретых (светящихся) тел, находящихся в конденсированном состоянии (то есть в твёрдом либо жидком), и **одинаков** для всех веществ.

Если источником света является вещество, находящееся в газообразном состоянии (пламя свечи, спички, газоразрядная трубка и др.), то при разложении их света наблюдается совсем другая картина: узкие линии разного цвета на тёмном фоне. Такой спектр называется линейчатым. **Линейчатый спектр** дают светящиеся газы, состоящие из отдельных атомов. Цвет спектральных линий линейчатого спектра называют *чистым цветом*, так как он не является результатом наложения волн разных частот, а имеет одну, вполне определённую, частоту, и соответственно одну длину волны (например, цвет спектральной линии с длиной волны **546 нм** в спектре ртути принят за эталон **зелёного** цвета).

Оказывается, спектральный состав, т. е. набор частот и длин волн у каждого химического элемента свой, индивидуальный. На этом основан **спектральный анализ**: по спектру излучения определяют присутствие того или иного элемента в излучающем газообразном веществе. Линейчатый спектр дают только отдельные атомы, поэтому для проведения спектрального анализа вещество испаряют – превращают в газ. Уместно заметить, что если в газе присутствуют атомы, объединившиеся в молекулы, вид спектра несколько изменяется: появляется множество размытых и неярких линий, на фоне которых остаются яркие линии атомарного спектра.

Описание установки

На принципе разложения света в спектр основана работа приборов, предназначенных для наблюдения спектров и определения длин волн спектральных линий – спектроскопов и спектрографов.

Общий вид одного из таких приборов – **монохроматора** – изображён на рис. 6.2. Основной частью монохроматора является призма, разлагающая свет в спектр. Свет на призму попадает от источника света через щель регулируемой ширины в виде узкого пучка параллельных лучей. После преломления в призме лучи фокусируются линзой на экран, где и получается изображение спектра. Спектр наблюдается глазом через окуляр 1.

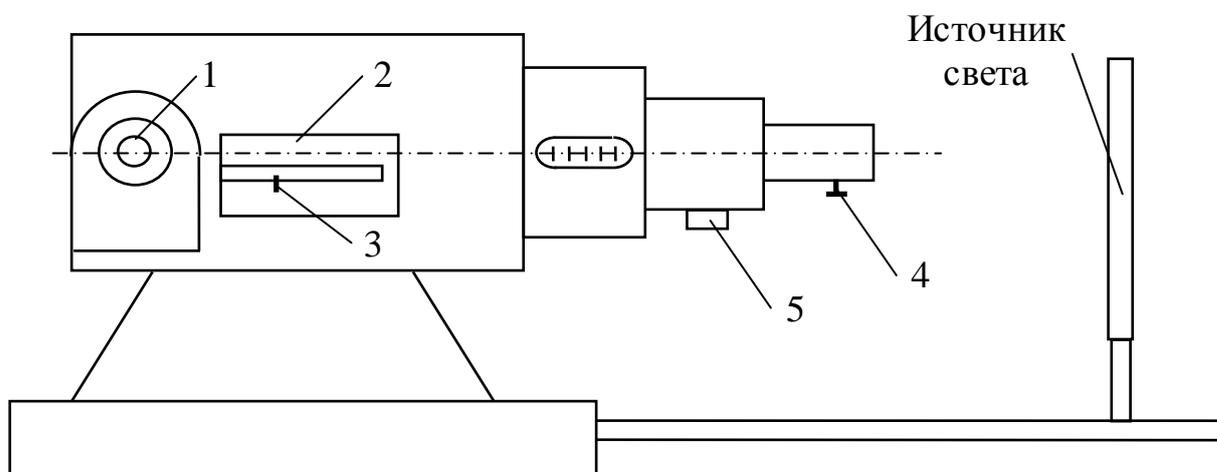


Рис. 6.2

Поскольку спектр очень длинный, то в поле зрения прибора попадает лишь небольшая его часть. Поворачивая призму, можно наблюдать разные участки спектра. Поворот призмы осуществляется вращением барабана 2, на котором нанесены деления – градусы, отсчёт которых ведётся по передвижному указателю 3. Для определения длины волны наблюдаемую спектральную линию устанавливают точно на вершину треугольного указателя, видимого в середине поля зрения окуляра, и считывают показания на лимбе барабана 2 по указателю 3. Для удобства наблюдений треугольник в поле зрения окуляра может освещаться белым, зелёным, красным и другими цветами.

Винтом 4 можно регулировать ширину щели, через которую проходит свет. Рукоятка 5 с надписью «закрыто – открыто» предназначена для перекрывания светового потока.

Выполнение работы

Задание 1. Наблюдение спектра лампы дневного света и градуировка монохроматора

Для того чтобы с помощью монохроматора находить длины волн спектральных линий, монохроматор нужно *проградуировать*, то есть установить, какому делению N барабана какая длина волны λ соответствует. Иначе говоря, нужно построить градуировочный график – зависимость длины волны λ от показаний N барабана монохроматора. Для этого используется газ, спектр которого состоит из линий с известными длинами волн.

В рассматриваемой работе для градуировки прибора используется лампа дневного света. Спектр такой лампы – комбинированный. В излучении присутствует сплошной спектр, который излучается специально подобранным веществом – **люминофором**, нанесённым на внутреннюю стенку лампы. Люминофор светится под действием света, излучаемого присутствующими внутри лампы **парами ртути** при возбуждении атомов ртути электрическим разрядом. Спектр паров ртути – линейчатый, и он накладывается на сплошной спектр люминофора в виде узких ярких линий. Каждая линия имеет свой цвет и соответствующую длину волны. Наиболее яркие линии спектра ртути приведены в табл. 6.1 [4].

Таблица 6.1

Линии спектра ртути	Длина волны λ , нм	Деления барабана N , град
Желтая левая	579,1	
Желтая правая	577,0	
Зеленая яркая	546,1	
Слабая голубая	491,6	
Сине-фиолетовая	435,8	
Фиолетовая	404,7	

Перед началом измерений ознакомьтесь с расположением основных элементов лабораторной установки, определите и запишите в черновик цену деления барабана монохроматора.

Для выполнения измерений с разрешения присутствующего в лаборатории руководителя работ включите лампу дневного света и посмотрите в окуляр монохроматора. Если спектр не виден, либо виден плохо, обратитесь к преподавателю или к лаборанту. *Не крутите ручки!*

Прежде чем приступить к градуировке, внимательно рассмотрите в окуляр спектр лампы, перемещая его в поле зрения вращением барабана. (Опишите в отчете и дайте объяснения его характерным особенностям). Затем приступайте к **градуировке** прибора. Для этого, вращая барабан, последовательно устанавливайте в поле зрения окуляра представленные в табл. 6.1 спектральные линии так, чтобы середина линии приходилась точно на вершину треугольника, определяйте по указателю 3 (см. рис. 5.2) соответствующее деление N барабана и записывайте в табл. 6.1. Начинать удобно с «жёлтой левой».

Задание 2. Наблюдение спектра газоразрядной трубки и определение названия газа по его спектру

Для выполнения этого задания перед входной щелью монохроматора устанавливается газоразрядная трубка с неизвестным Вам газом. Газ в трубке находится при давлении, меньшем атмосферного (порядка 100 мм рт. ст.). К электродам трубки подводится высокое напряжение (около 10 кВ), под действием которого в трубке возникает электрический разряд. Атомы газа получают дополнительную энергию, и сбрасывают её в виде квантов электромагнитного излучения с определённым набором частот ν и соответствующими длинами волн $\lambda = c/\nu$. Атомы любого химического элемента излучают собственный набор частот – линейчатый спектр, индивидуальный для каждого химического элемента. Зная длины волн спектра, можно по спектральным таблицам определить, атомы какого химического элемента излучили этот спектр.

1. Подведите блок с газоразрядной трубкой вплотную к объективу монохроматора. Подайте питание на газоразрядную трубку, следуя инструкции на рабочем месте.

2. Найдите спектр, наблюдая его через окуляр монохроматора. Если спектр виден плохо, обратитесь к руководителю лабораторных работ.

3. Внимательно изучите спектр, опишите его вид.

4. Определите деления барабана монохроматора, соответствующие четырём самым ярким линиям видимого спектра, начиная с линий **красного** цвета. Замеры нужно проводить тщательно, устанавливая против указателя середину спектральной линии.

5. Цвета этих четырёх линий, и соответствующие им деления барабана запишите в табл. 6.2.

Таблица 6.2

№ п/п	Цвет линии	Деления барабана N	Длина волны $\lambda_{\text{эксп.}}$, нм	Длина волны $\lambda_{\text{табл.}}$, нм
1				
2				
3				
4				

Анализ и обработка результатов измерений

1. По данным из табл. 6.1 постройте **градуировочный график**. По оси ординат откладываются длины волн, а по оси абсцисс – деления барабана. График строят на миллиметровой бумаге. С правилами построения графиков ознакомьтесь в Приложении 1.

ВАЖНО! Выбирая масштаб графика, помните, что миллиметровая бумага даёт возможность точно задать три значащие цифры, если правильно выбрать размер графика и его масштабы. Для этого размер листа для построения графика должен быть не меньше $16 \times 20 \text{ см}^2$ (размер тетрадной страницы).

В качестве начальной точки на осях координат нужно взять по оси ординат 400 нм (чуть меньше, чем 404,7 нм), а по оси абсцисс – круглое значение, немного меньшее минимального показания барабана (например, $N_{\text{min}} = 863$, берём 850).

Экспериментальные точки наносите на миллиметровку в точном соответствии с числами из табл. 6.1 так, чтобы точки были хорошо видны на поле диаграммы. По точкам проведите плавную кривую. Строя график, не заканчивайте кривую на последней точке (с длиной волны 579 нм), а плавно продолжите её в область бóльших длин волн. Для этого, выбирая масштаб по оси ординат (λ), проставьте деления до 650–700 нм. Последнее значение масштаба по оси абсцисс (N) должно быть не меньше самого большого числа N в табл. 6.2.

2. По градуировочному графику и значениям N из табл. 6.2 определите экспериментальные значения длин волн ($\lambda_{\text{эксп.}}$) в излучении газоразрядной трубки, и запишите их в соответствующие ячейки таблицы.

3. Зарисуйте спектр, нанеся каждую линию на ось λ с соблюдением масштаба, интенсивности и цвета линии излучения.

4. Сравните полученные значения длин волн с таблицами спектральных линий газов (прил. 2, табл. П2.4) и определите, какой газ находился в спектральной трубке. Наиболее близкие к экспериментальным табличные значения длин волн ($\lambda_{\text{табл.}}$) запишите в последний столбец табл. 6.2 как обоснование Вашего выбора.

5. Сформулируйте и напишите вывод, обобщающий полученные Вами результаты наблюдений, измерений, расчётов и сравнений.

Контрольные вопросы

1. Какое явление лежит в основе работы призмных спектрометров? Как получают в них спектр?
2. Что представляет собой спектр? Какого типа спектры вы знаете? Какой из них лежит в основе спектрального анализа?
3. Опишите принцип действия монохроматора. За счёт чего происходит перемещение участков спектра в поле зрения окуляра?
4. Почему в лампе дневного света Вы наблюдается наложение двух видов спектра? Каких?
5. Объясните, как происходит процесс излучения в газоразрядной трубке. Какой тип спектра она излучает и почему?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физический энциклопедический словарь / под ред. А.М. Прохорова. – М.: Советская энциклопедия, 1984.
2. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. – М.: Физматгиз, 1976.
3. Кошкин, Н.И. Справочник по элементарной физике / Н.И. Кошкин, М.Г. Ширкевич.– М.: Наука, 1988.
4. Иттен, И. Основы цвета / И. Иттен. – М.: Изд. Д. Аронов, 2008.
5. Таблицы физических величин: справочник / под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

1. Правила действий с приближёнными числами

1. Все результаты измерений являются приближёнными числами. Например, при измерении ширины тетради сантиметровой линейкой получилось приблизительно 17 см, а при измерении линейкой с миллиметровыми делениями – 16,7 см. Оба числа – приближённые, т.е. указывающие ширину тетради с определённой точностью, которая задаётся измерительным прибором.

2. Точность приближённого числа определяется числом **значащих цифр**, выражающих это число.

3. **Значащими** считаются **все цифры** числа, **кроме нулей**, стоящих **впереди** первой цифры, не равной нулю (т.е. слева от неё), а также нулей, определяющих **порядок** числа.

Примеры:

Одна значащая цифра	Две значащие цифры	Три значащие цифры
4	43	$105000 = 1,05 \cdot 10^5$
$0,0004 = 4 \cdot 10^{-4}$	$0,043 = 43 \cdot 10^{-3}$	$0,00105 = 1,05 \cdot 10^{-3}$
$4000 = 4 \cdot 10^3$	$4300 = 4,3 \cdot 10^3$	10,5

ВНИМАНИЕ! Не надо путать число значащих цифр с числом знаков после запятой – это глубоко укоренившееся заблуждение!

4. Результат любого арифметического действия с приближёнными числами нужно **округлить** до той точности (того же числа значащих цифр), какую имели **исходные** числа. В промежуточных вычислениях допускается **одна** запасная цифра. Правила округления – общепринятые.

Примеры: $23:14 = 1,6$; $23:14 \cdot 5,87 = 1,64 \cdot 5,87 = 9,6(3)$; $\sqrt{936} = 30,6$ (а калькулятор показывает $= 30,59411708\dots$).

2. Погрешности измерений

ВНИМАНИЕ! Данные измерений, т.е. показания приборов – **не округляются!**

1. Любые измерения имеют погрешности. Абсолютно точных измерений не бывает! Погрешности определяют по-разному в зависимости от вида измерения.

2. Виды измерений:

- прямые – результат считывают по шкале прибора (линейки, секундомера, вольтметра, пирометра и др.);
- косвенные – результат определяется расчётом (объём параллелепипеда по длине сторон, мощность по току и напряжению и др.);
- однократные;
- многократные.

3. Виды погрешностей:

- приборные – погрешность равна цене деления прибора;

- случайные – при многократных измерениях одной и той же величины точным прибором;
- систематические – измерения неисправным прибором (секундомер спешит или отстаёт, сдвинут нуль шкалы и др.).

4. **Результат измерений** представляют в виде:

$$X = X_{\text{и}} \pm \Delta X, \quad (1)$$

где $X_{\text{и}}$ – показания прибора (при прямых измерениях), или результат расчёта (при косвенных измерениях), или среднее значение (при многократных измерениях); ΔX – погрешность измерения.

5. **Случайные погрешности** определяют методами математической статистики, в которой предполагается, что наиболее близким к истинному значению измеряемой величины X является **среднее арифметическое** $\langle X \rangle$ от результатов измерений этой величины:

$$\langle X \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad (2)$$

где N – число измерений; i – номер измерения; X_i – значение, полученное при измерении с номером i .

6. **Абсолютная погрешность** ΔX_i конкретного (i -го) измерения определяется как разность между средним и конкретным значениями:

$$\Delta X_i = \langle X \rangle - X_i, \quad (3)$$

то есть является отклонением от среднего значения. Как видно из определения, ΔX_i может быть и положительной, и отрицательной величиной.

7. **Средняя абсолютная погрешность** $\langle \Delta X \rangle$ определяется как среднее арифметическое отклонений (3), взятых по модулю (без учёта знака!):

$$\langle \Delta X \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Delta X_i| \quad (4)$$

и затем, при записи **результата измерений** округляется до **одной** значащей цифры (или до двух цифр, если первая значащая цифра – единица).

8. **Результат измерений** со случайными погрешностями представляют в виде:

$$X = \langle X \rangle \pm \langle \Delta X \rangle. \quad (5)$$

Такая запись означает, что истинное значение измеренной величины лежит в интервале от $(\langle X \rangle - \langle \Delta X \rangle)$ до $(\langle X \rangle + \langle \Delta X \rangle)$. При записи результата измерений среднее значение $\langle X \rangle$ округляют так, чтобы последняя значащая цифра в этом числе имела тот же порядок, что и $\langle \Delta X \rangle$.

9. **Точность** измерения характеризуется **относительной погрешностью** ε , и выражается обычно в процентах:

$$\varepsilon = \frac{\langle \Delta X \rangle}{\langle X \rangle} 100\%. \quad (6)$$

После вычисления значение ε нужно обязательно округлить до одной-двух значащих цифр. Например, 1,473 % надо округлить до 1,5 %, а 3,7 % – до 4 %.

Полезно знать, что число, записанное с одной значащей цифрой, имеет относительную погрешность около 10 %; с двумя значащими цифрами – около 1 %; с тремя значащими цифрами – около 0,1 %

2. Практическая методика обработки результатов измерений

С целью унификации записей обработка данных производится в форме, представленной в табл. П1.1.

Таблица П1.1

№ п/п	Данные измерений $X_i, [...]^*$	Отклонение от среднего $\Delta X_i, [...]$	
		–	+
1			
2			
...			
...			
Среднее значение: $\langle X \rangle = \dots$		Сумма "–"	Сумма "+"
Средняя абсолютная погрешность: $\langle \Delta X \rangle = \dots$			
Результат измерений: $X = (\langle X \rangle \pm \langle \Delta X \rangle) [...]$			
Относительная погрешность: $\varepsilon = (\langle \Delta X \rangle / \langle X \rangle) \cdot 100 \%$			

* [...] – единица измерения.

Для заполнения таблицы нужно произвести следующие действия.

1. Записать в таблицу табл. П-1.1 данные, полученные Вами при выполнении измерений и расчётов.

2. Найти среднее значение измеренной величины по формуле (2), записать в соответствующую ячейку таблицы.

3. Вычислить отклонения от среднего. (формула (3)) Отрицательные отклонения записать в столбик под знаком "–", положительные — под знаком "+".

4. Вычислить сумму положительных и отрицательных отклонений. При правильно найденном среднем значении эти суммы должны быть одинаковыми. (Из-за округления среднего значения могут быть незначительные расхождения между суммами).

5. Найти **среднюю абсолютную погрешность**, сложив суммы положительных и отрицательных отклонений и поделив **на число измерений** (а не на 2!).

6. Записать **результат измерений** (см. формулу (1)) в виде

$$X = \langle X \rangle \pm \langle \Delta X \rangle [\text{ед. измерения}], \quad (5)$$

округлив $\langle \Delta X \rangle$ до **одной значащей цифры** (допускается до двух значащих цифр, если первая значащая 1 или 2). Среднее значение $\langle X \rangle$ также нужно округлить до того же порядка, на котором заканчивается средняя абсолютная погрешность.

7. Найти относительную погрешность измерений по формуле (6), **округлить** до 1–2 значащих цифр, и записать в последнюю строку таблицы.

В качестве примера ниже приведена таблица обработки результатов измерения штангенциркулем (приборная погрешность 0,1 мм) некоторого размера L .

Таблица П1.2

№ п/п	L , мм	$\langle L \rangle - L_i$, мм	
		–	+
1	89,1	–	0,15
2	89,7	0,45	–
3	88,6	–	0,65
4	88,9	–	0,35
5	89,9	0,65	–
6	89,3	0,05	–
$\langle L \rangle = 89,25$ мм		1,15	1,15
$\langle \Delta L \rangle = \frac{1,15 + 1,15}{6} = 0,38$ мм			
Результат измерений:		$l = (89,3 \pm 0,4)$ мм	
Относительная погрешность		$\varepsilon = \frac{0,4}{89,3} \cdot 100\% = 0,5\%$	

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ! Значения L поставлены с той точностью, которую даёт прибор, все числа с тремя значащими цифрами. Среднее значение этой величины записано с запасной цифрой. Результат же измерений записан без этой запасной цифры. Абсолютная погрешность округлена до одной значащей цифры, разряд которой – десятые доли миллиметра, поэтому и среднее значение округлено до десятых. Относительная погрешность также округлена до одной значащей цифры.

5. Графическая обработка результатов измерений

Очень часто обработку результатов производят *графическим способом*, который сразу даёт наглядное представление о характере зависимости одной величины от другой. Обычно график представляет зависимость между двумя переменными. Выполняется график **на миллиметровой бумаге**. Сначала вычерчиваются координатные оси, на которые наносится масштаб. В конце оси указывается обозначение откладываемой величины, её единица измерения, а также *порядок масштаба* (рис. П1.1). Порядок масштаба определяется числом нулей, стоящих либо перед значащими цифрами, либо после них. Масштаб содержит лишь значащие цифры. Если, например, сопротивление в опыте менялось от 0,0021 до 0,0086 Ом, в конце оси ставится множитель 10^{-3} Ом, а деления масштаба изменяются соответственно от 2,0 до 9,0.

Масштаб наносится в соответствии с таблицей наблюдений: первое деление масштаба на каждой оси выбирается близким к минимальному значению откладываемой величины начальным числом таблицы, т.е. может не совпадать с нулем

(если наличие начала координат необязательно). Конечное значение масштаба определяется наибольшим значением откладываемой величины (рис. П1.2).

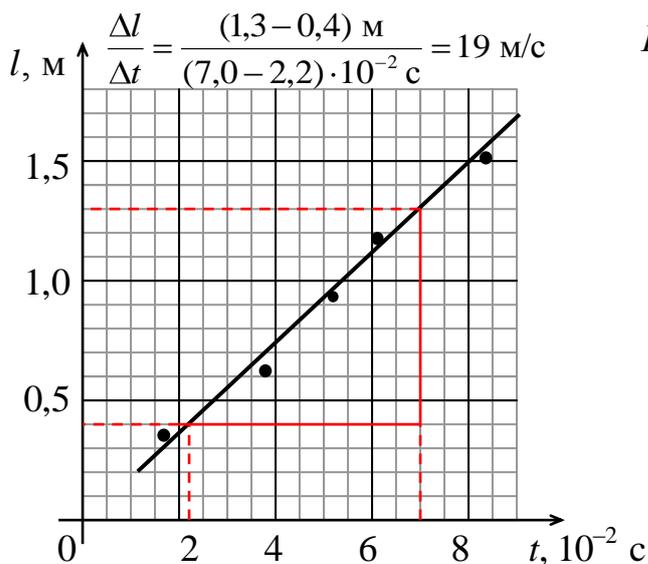


Рис. П1.1

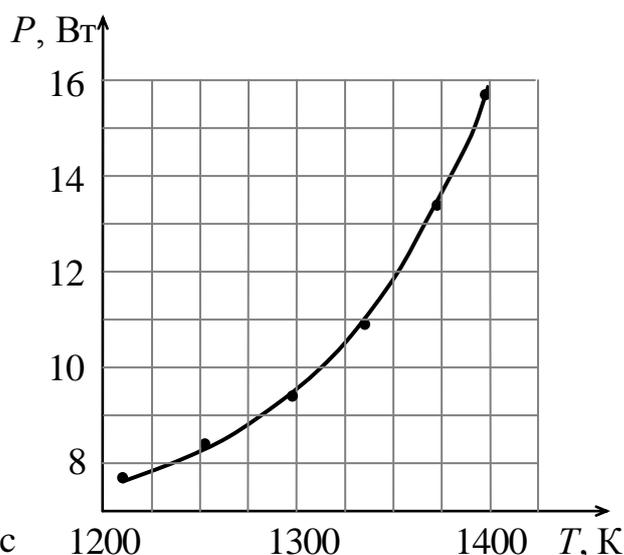


Рис. П1.2

Следует выполнять еще одно правило: **график должен быть близок к квадрату**, т. е. длины обеих осей должны быть примерно одинаковыми. Этого добиваются соответствующим подбором масштабов (см. рис. П1.1). Кроме того, выбранный Вами масштаб должен позволить нанести все точки из таблицы наблюдений с имеющейся там точностью: все значащие цифры из таблицы наблюдений должны легко определяться на соответствующих осях.

После того, как нанесены все точки, следует провести по ним плавную кривую (или прямую) так, чтобы сумма отклонений экспериментальных точек от графика была минимальной. При проведении прямых графиков удобно пользоваться прозрачной линейкой.

По линейным графикам часто определяется угловой коэффициент изображаемой зависимости. На рис. П1.1 изображена такая зависимость координаты l от времени t , и показано, как определяется её угловой коэффициент $\Delta l / \Delta t$, имеющий размерность скорости.

Ниже представлены таблицы данных, по которым построены графики на рис. П1.1 и П1.2

Таблица П1.3

№ п/п	l , м	t , с
1	0,35	0,017
2	0,62	0,038
3	0,94	0,052
4	1,18	0,062
5	1,52	0,084

Таблица П1.4

№ п/п	T , К	P , Вт
1	1210	7,5
2	1255	8,2
3	1295	9,3
4	1335	10,9
5	1370	13,3
6	1400	15,8

Единицы измерения световых величин

Наименование величины и обозначение	Единица		
	Наименование	Обозначение	Определение, определяющая формула
Сила света I	кандела	кд	Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср (длина волны – 555 нм)
Энергия излучения W	джоуль	Дж	Джоуль равен энергии излучения, эквивалентной работе 1 Дж
Поток излучения Φ_s	ватт	Вт	$\Phi_s = W/t$
Световой поток Φ	люмен	лм	$\Phi = I\Omega$
Световая энергия Q	люмен-секунда	лм·с	$Q = \Phi t$
Энергетическая светимость R_s	ватт на квадратный метр	Вт/м ²	$R_s = \Phi_s/S$
Светимость R	люмен на квадратный метр	лм/м ²	$R = \Phi/S$
Яркость B	кандела на квадратный метр	кд/м ²	$B = I/S$
Освещённость E	люкс	лк	$E = \Phi/S$
Дополнительные единицы			
Плоский угол φ	радиан	рад	Радиан равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу
Телесный угол Ω	стерадиан	ср	Стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы

Таблица П2.2

Основные цвета спектра и соответствующие им длины волн [4]

Цвет	Длина волны, нм
Фиолетовый	400–450
Синий	450–480
Голубой	480–510
Зеленый	510–565
Желтый	565–580
Оранжевый	580–620
Красный	620–700

Таблица П2.3

Относительная спектральная чувствительность K_λ [3]
(таблица для построения графика видности)

Длина волны, нм	K_λ	Длина волны, нм	K_λ	Длина волны, нм	K_λ
400	0,0004	520	0,710	640	0,175
420	0,0040	540	0,954	660	0,061
440	0,023	560	0,995	680	0,017
460	0,060	580	0,870	700	0,0041
480	0,139	600	0,631	720	0,00105
500	0,323	620	0,381	740	0,00025

Примечание. Значения K_λ различны для разных людей. Однако эти значения не очень сильно отличаются для людей с нормальным зрением. В таблице приведены средние значения. Максимальная чувствительность $K_\lambda = 1,00$ приходится на длину волны $\lambda = 555$ нм.



Рис. П2.1. Основные и дополнительные цвета системы RGB [4]

Таблица П2.4

Длины волн спектральных линий некоторых газов, нм [5]

Водород	Гелий	Неон	Аргон	Криптон
410,2	388,9	453,8	404,4	431,9
434,0	402,6	457,6	415,9	435,14
486,1	412,0	470,9	419,1	440,0
656,3	501,6	478,9	426,6	446,4
	587,6	535,8	433,4	557,0
	667,8	585,3	462,8	565,0
	706,5	597,6	565,1	587,1
		626,7	614,5	599,3
		640,2	666,4	605,6
		650,7	696,5	642,1

Примечание. В таблице приведены только наиболее яркие линии в видимой части спектра.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Правила безопасного поведения в лаборатории оптики	3
Методические указания и рекомендации	4
Основные представления и законы оптики	5
Свет как физический объект	5
Геометрическая оптика. Показатель преломления	6
Состав белого света. Спектры	8
Элементы волновой оптики	8
Поперечность световых волн. Поляризация света	13
Энергия света. Энергетические и световые величины	14
Лабораторная работа № 1. Определение дисперсии стекла оптической линзы	16
Лабораторная работа № 2. Изучение дифракции света и определение длины световой волны	20
Лабораторная работа № 3. Определение спектральной чувствительности фотоэлемента	25
Лабораторная работа № 4. Изучение зависимости яркости и цвета нагретого тела от его температуры	28
Лабораторная работа № 5. Изучение поляризации света	32
Лабораторная работа № 6. Наблюдение сплошного и линейчатого спектров и определение длин волн спектральных линий	39
Библиографический список	45
Приложения	46