

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

Л.А. Беховых, Ю.В. Беховых, Е.Г. Сизов

## **ОПТИКА**

*Лабораторный практикум*

Барнаул  
Издательство АГАУ  
2012

УДК 535

Рецензенты:

к. ф.-м. н., д. п. н., директор института физико-математического образования АлтГПА А.В. Овчаров;

к. ф.-м. н., доцент кафедры общей физики АлтГТУ Е.В. Черных.

Беховых Л.А., Беховых Ю.В., Сизов Е.Г. Оптика: лабораторный практикум. Барнаул: Изд-во АГАУ, 2012. 96 с.

Учебное издание содержит теоретические сведения и описания лабораторных работ по разделу «Оптика» курса «Физика»

Предназначено для студентов очного и заочного отделений инженерных направлений подготовки аграрных вузов.

Рекомендовано к изданию методической комиссией факультета природообустройства АГАУ (протокол № 6 от 5 мая 2012 г.).

© Беховых Л.А., Беховых Ю.В., Сизов Е.Г., 2012

© ФГБОУ ВПО АГАУ, 2012

## Содержание

<i>Правила техники безопасности в лаборатории</i>	4
<i>Измерение физических величин и обработка результатов измерений</i>	5
<i>Лабораторная работа № 1. Определение показателя преломления растворов при помощи рефрактометра</i>	16
<i>Лабораторная работа № 2. Исследование качества обработки поверхностей микроинтерферометром Линника</i>	24
<i>Лабораторная работа № 3. Определение длины световой волны методом дифракционной решетки</i>	33
<i>Лабораторная работа № 4. Определение концентрации вещества в растворе фотозлектроколориметром</i>	44
<i>Лабораторная работа № 5. Определение концентрации сахара в растворе сахариметром</i>	54
<i>Лабораторная работа № 6. Изучение спектров испускания нагретых тел</i>	64
<i>Лабораторная работа № 7. Исследование вакуумного фотоэлемента</i>	74
<i>Лабораторная работа № 8. Изучение принципа действия лазера и его применение для определения ширины узкой щели</i>	84
<i>Приложение</i>	93
<i>Библиографический список</i>	96

## ***ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ В ЛАБОРАТОРИИ***

1. Студент может находиться в лаборатории только в присутствии преподавателя или с его разрешения.
2. Студенты допускаются к выполнению лабораторных работ с разрешения преподавателя, после беседы, на которой выясняется степень подготовленности студента.
3. Студент обязан строго придерживаться всех указаний о порядке выполнения работы, данных в описании или полученных от преподавателя. Особое внимание должно уделяться указаниям, касающимся техники безопасности при работе с данным прибором или установкой.
4. Студентам запрещается включать общие выключатели на щитах.
5. Запрещается трогать и пользоваться приборами, не относящимися к выполняемой работе. В случае отсутствия нужного прибора необходимо обратиться к преподавателю или лаборанту.
6. Запрещается поворачивать какие-либо рукоятки, нажимать кнопки, назначение которых не известны или не ясны.
7. Запрещается даже на короткое время отходить от работающей установки. Если нужно отойти – необходимо выключить все электрические приборы.
8. Если студент испортил прибор (установку), начав работать без разрешения преподавателя, то ремонт установки или покупка нового прибора взамен испорченного производится за счет студента.
9. Беспорядок и наличие посторонних предметов на столе недопустимо.
10. Разбирать и вносить дополнительные изменения в установки не допускается. В случае неисправности прибора следует немедленно сообщить об этом преподавателю и не пытаться самостоятельно ее устранить.
11. По окончании работы каждый студент должен предъявить преподавателю таблицу с результатами и, сдав оборудование, восстановить порядок на рабочем столе.
12. Занятия в лаборатории проводятся с одной группой (подгруппой) в часы, предусмотренные расписанием. Студенты, пропустившие занятия по уважительной причине, должны договориться с преподавателем и выполнить работу в дополнительное время, не нарушая графика работ своей группы.

## **ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ**

Физика – наука экспериментальная. Любое физическое исследование начинается с накопления опытных данных посредством измерения физических величин, связанных между собой определенными количественными соотношениями – законами.

Физические величины подразделяются на *основные* и *производные*. *Основные* величины независимы друг от друга и используются для установления связей с другими физическими величинами, которые называют *производными*. Основным величинам соответствуют *основные единицы измерений*, а производным – *производные*. Совокупность основных и производных единиц представляет собой систему единиц физических величин.

В мировой практике наиболее широко распространена Международная система единиц (СИ – система интернациональная). В данную систему входят семь основных единиц, две дополнительных и ряд производных единиц физических величин. Основными единицами измерений являются: *метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль, кандела*, а дополнительными – *радиан* и *стерадиан*. Остальные единицы измерений времени, механических, электрических, магнитных, тепловых, световых, акустических и других величин являются производными.

Вместе с единицами международной системы применяются и внесистемные единицы, например, сутки, литр, тонна, гектар и др.

*Измерение* – это процесс нахождения значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Измерить – это значит определить, во сколько раз измеряемая физическая величина больше или меньше однородной ей физической величины, принятой за единицу (*эталон*).

Измерения классифицируются на прямые и косвенные. *Прямыми измерениями* называют такие, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных (например, измерение длины линейкой, определение массы на весах, температуры – термометром и т.д.). *Косвенными измерениями* называют измерения, при которых искомую величину определяют расчетным путем, используя формулу зависимости ее от других величин, получаемых в ходе прямых измерений (например, определение плотности тела по его массе и геометрическим размерам и т.д.).

## Средства и методы измерений

Для измерения физических величин используются различные технические средства, называемые *средствами измерений* (измерительными приборами). Каждый измерительный прибор характеризуется *пределом* (максимальной величиной измерения) и *ценой деления* (отношением предельного значения к полному числу делений шкалы).

Совокупность правил, определяющих принципы и средства измерения, называется *методом измерения*. На практике широкое распространение получили методы:

- 1) непосредственной оценки;
- 2) дифференциальный;
- 3) нулевой.

Метод непосредственной оценки реализуется при прямых измерениях.

В дифференциальном методе на измерительный прибор воздействует разность измеряемой и базовой (значение которой известно) величин. При использовании этого метода необходимо иметь базовую величину, значение которой близко к измеряемой величине и определено с высокой точностью.

В нулевом методе измеряемую величину сравнивают с величиной, значение которой известно, но разность между ними сводится к нулю путем изменения известной величины. Примером нулевого метода может служить измерение массы тела на рычажных весах. Этот метод обеспечивает высокую точность измерений.

## Погрешности измерений и их классификация

Ни одно измерение не может быть выполнено абсолютно точно. Вследствие ряда причин (несовершенство измерительных приборов, наших органов восприятия и других факторов) все измерения можно производить только с известной степенью точности, поэтому результаты измерений дают нам не истинное значение измеряемой величины, а лишь приближенное, называемое действительным.

Отклонение результата измерения  $x$  от истинного значения измеряемой величины  $x_{ист}$  называется *абсолютной погрешностью* измерения  $\Delta x$ :

$$\Delta x = |x - x_{ист}|. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что абсолютная погрешность измеряется в тех же единицах, что и измеряемая величина и указывает в каких пределах заключено истинное значение  $x_{ист}$  этой величины, то есть:

$$x + \Delta x > x_{ист} > x - \Delta x$$

или

$$x_{ист} = x \pm \Delta x. \quad (2)$$

В большинстве случаев для указания точности измерений удобнее пользоваться понятием относительной погрешности, которая показывает, какую долю измеряемой величины составляет абсолютная погрешность:

$$E = \frac{\Delta x}{x}. \quad (3)$$

Относительной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности к результату измерения.

Относительную погрешность обычно выражают в процентах:

$$E = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Погрешности классифицируются на систематические, случайные и грубые (промахи).

1. Грубые погрешности возникают в результате невнимательной работы экспериментатора или плохих условий наблюдения. Результаты, содержащие грубую погрешность, резко отличаются от остальных, и их не принимают во внимание.

2. Систематической погрешностью называется составляющая погрешности измерения, которая остается постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины. Такие погрешности возникают, например, из-за инструментальной погрешности прибора (указывается на нем или в паспорте) или метода измерения (взвешивание тела без учета выталкивающей силы Архимеда). Систематические погрешности имеют определенное значение и знак, они могут быть устранены путем внесения поправки, то есть величины, прибавляемой к полученному при измерении значению.

3. Случайная погрешность – это составляющая погрешности, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Она вызвана разными причинами: несовершенством измерительных приборов, органов восприятия человека, методов измерений и других воздействий, причины которых остаются не-

известными человеку. Случайные погрешности устранить нельзя, однако их можно учесть при представлении результата.

Целью вычисления погрешностей измерения является оценка точности результата, то есть степени его приближения к истинному значению определяемой величины. Результаты с неизвестной точностью практической ценности не представляют и в ряде случаев могут служить источником антинаучных знаний.

### Оценка случайных погрешностей при прямых измерениях

Если исключить систематические и грубые погрешности, то даже при использовании средств измерения повышенной точности на результаты измерений будут оказывать влияние различные случайные факторы, не поддающиеся учету и контролю. Оценка возникающих при этом случайных погрешностей осуществляется с помощью законов математической статистики.

При оперировании результатами прямых измерений, не требующих высокой точности, достаточно рассчитать абсолютную и относительную погрешности методом среднего арифметического:

1. Найти среднее арифметическое значение измеряемой величины из  $n$  измерений по формуле:

$$x_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}.$$

2. Определить абсолютную погрешность каждого измерения:

$$\Delta x_1 = |x_{cp} - x_1|,$$

$$\Delta x_2 = |x_{cp} - x_2|,$$

.....

$$\Delta x_n = |x_{cp} - x_n|.$$

3. Найти среднюю абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta x_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n}{n}.$$

4. Найти среднюю относительную погрешность:

$$E = \frac{\Delta x_{cp}}{x_{cp}} \cdot 100\%.$$

5. Конечный результат представить в виде:

$$x = (x_{cp} \pm \Delta x_{cp});$$

$$E = \dots \%$$

В случае однократных измерений, а также когда повторные измерения дают одно и то же значение измеряемой величины, погрешность измерений принимается равной инструментальной (приборной) погрешности.

Инструментальная погрешность указывается в его паспорте или на шкале. На шкалах многих измерительных приборов указывается класс точности. Его условным обозначением является цифра, обведенная кружком. Класс точности определяет абсолютную приборную погрешность в процентах от предела измерения. Если прибор не имеет паспорта или на нем не указан класс точности, то в качестве приборной погрешности принимают половину наименьшей цены деления шкалы прибора.

Если рассчитанная абсолютная погрешность получается меньше приборной, то в качестве абсолютной погрешности измерений принимают приборную погрешность.

### **Оценка случайных погрешностей при косвенных измерениях**

Если измеряемая косвенным методом величина  $y$  связана с величинами, определяемыми прямыми измерениями  $x_1, x_2, \dots, x_n$  функциональной зависимостью  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , то для определения погрешностей при таких измерениях можно воспользоваться дифференциальным методом.

В основе этого метода лежит свойство натурального логарифма:

$$d(\ln y) = \frac{dy}{y}. \quad (5)$$

Полный дифференциал логарифма функции  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  определяется выражением:

$$d(\ln f(x_1, x_2, \dots, x_n)) = k_1 \frac{dx_1}{x_1} + k_2 \frac{dx_2}{x_2} + \dots + k_n \frac{dx_n}{x_n}, \quad (6)$$

где  $k_1, k_2, \dots, k_n$  – показатели степени аргументов  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Отсюда следует:

$$\frac{dy}{y} = k_1 \frac{dx_1}{x_1} + k_2 \frac{dx_2}{x_2} + \dots + k_n \frac{dx_n}{x_n}. \quad (7)$$

Из курса математического анализа известно, что дифференциал независимой переменной  $x$  равен ее приращению, то есть  $dx = \Delta x$ , и если приращение аргумента достаточно мало для функции, то дифференциал функции приблизительно равен ее приращению, то есть  $dy \approx \Delta y$ . С учетом этого, а также выражений (5) и (7) получаем:

$$E = \frac{\Delta y}{y} = k_1 \frac{\Delta x_1}{x_1} + k_2 \frac{\Delta x_2}{x_2} + \dots + k_n \frac{\Delta x_n}{x_n}.$$

Если в результате логарифмирования и дифференцирования в выражении появились знаки «-», то с целью нахождения максимальной относительной погрешности их необходимо заменить на «+».

Таким образом, чтобы воспользоваться данным методом, необходимо:

- а) прологарифмировать исходную функцию;
- б) продифференцировать полученное выражение логарифма;
- в) заменить все знаки дифференциала  $d$  на приращения  $\Delta$ ;
- г) заменить все минусы, полученные при логарифмировании и дифференцировании, на плюсы;

д) рассчитать относительную погрешность косвенного измерения, используя полученную формулу, подставив в нее значения величин, полученных при прямых измерениях, и их абсолютные погрешности;

е) рассчитать абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta y = E \cdot y_{изм};$$

ж) окончательный результат записать в виде:

$$y = (y_{изм} \pm \Delta y);$$

$$E = \dots \%$$

Пример. Определим погрешности косвенного измерения ширины узкой щели дифракционным методом (работа №8). Расчетная формула имеет вид:

$$b = \frac{k \cdot \lambda \cdot L}{x_k},$$

где  $k=1, 2, 3 \dots$  – порядок дифракционного минимума;

$\lambda$  – длина волны света;

$L$  – расстояние от щели до экрана;

$x_k$  - расстояние между центральным максимумом и минимумом  $k$ -го порядка.

Величины  $L$ ,  $x_k$  и  $\lambda$  определяются в ходе прямых измерений.

а)  $\ln b = \ln k + \ln \lambda + \ln L - \ln x_k$ ;

б)  $\frac{db}{b} = \frac{dk}{k} + \frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{dL}{L} - \frac{dx_k}{x_k}$ ,  $\frac{dk}{k} = 0$  ( $k$  - константа);

в)  $\frac{\Delta b}{b} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta x_k}{x_k}$ ;

г)  $E_b = \frac{\Delta b}{b}$ , то есть  $E_b = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta x_k}{x_k}$ ,

где  $\Delta \lambda$ ,  $\Delta L$ ,  $\Delta x_k$  – средние абсолютные погрешности при прямых измерениях;

$\lambda$ ,  $L$ ,  $x_k$  – средние значения этих величин.

Абсолютную погрешность определим по формуле:

$$\Delta b_{cp} = E \cdot b_{cp}.$$

Конечный результат представим в виде:

$$b = (b_{cp} \pm \Delta b_{cp}) \text{ м};$$

$$E = \dots \%$$

Более точно рассчитать случайные погрешности позволяют методы математической статистики.

## Математическая обработка результатов измерений

Ошибка результата определяется не только неточностями измерений, но и неточностями вычислений. Вычисления необходимо проводить так, чтобы их ошибка была на порядок меньше ошибки результата измерений. Для этого необходимо вспомнить правила математических действий с приближенными числами.

*Значащими* называются все цифры кроме нуля, стоящего слева от чисел. Ноль, стоящий между значащими цифрами или справа от них, также значащая цифра.

Примеры:

1) 0,0105. Два нуля слева – не значащие цифры. Всего число имеет три значащих цифры, в том числе и ноль, стоящий между значащими цифрами 1 и 5;

2) 5000. Нули справа – значащие. Всего число имеет четыре значащих цифры (нули получились не в результате округления, а при измерении);

3)  $5 \cdot 10^3$ . Число имеет одну значащую цифру, то есть при измерениях учитывались только тысячи. Точность числа  $5 \cdot 10^3$  в тысячу раз меньше 5000.

### *Правила округления чисел*

Если не все числа заканчиваются на одном и том же разряде, то для упрощения действий до их выполнения следует произвести округления до разряда на единицу меньшего, чем разряд наименее точного числа по правилам 1, 2 и 3.

$$\text{Пример. } \frac{(23,2 + 0,442 + 7,247) \cdot 1,836}{2,412} \approx \frac{(23,2 + 0,44 + 7,25) \cdot 1,84}{2,41}.$$

Правило 1. Округление достигается простым отбрасыванием цифр, если первая из отбрасываемых цифр меньше, чем 5.

$$\text{Пример. } 0,234 \approx 0,23.$$

Правило 2. Если первая из отбрасываемых цифр больше, чем 5, то последняя цифра увеличивается на 1. Последняя цифра увеличивается также и в том случае, когда первая из отбрасываемых цифр 5, а за ней есть одна или несколько цифр, отличных от нуля.

$$\text{Пример. } 35,856 \approx 35,9.$$

Правило 3. Если отбрасываемая цифра равна 5, а за ней нет значащих цифр, то округление производится на ближайшее четное число. Последняя сохраняемая цифра остается неизменной, если она четная, и увеличивается на единицу, если она нечетная.

$$\text{Пример. } 0,0465 \approx 0,046; 0,935 \approx 0,94.$$

При выполнении математических операций также возникает необходимость округления чисел, которое проводится в соответствии с правилами.

1. При сложении и вычитании приближенных чисел следует сохранить столько десятичных знаков, сколько их в приближенном данном с наименьшим числом десятичных знаков:

$$\text{Пример. } 23,2 + 0,442 + 7,247 \approx 23,2 + 0,44 + 7,25 \approx 30,9.$$

2. При умножении и делении приближенных чисел произведение или частное будет иметь столько значащих цифр, сколько их имеет приближенное данное с наименьшим числом значащих цифр:

$$\text{Пример. } 30,9 \cdot 1,8364 \approx 30,9 \cdot 1,84 = 56,856 \approx 56,9;$$

$$56,9 : 2,412 \approx 56,9 : 2,41 = 23,609 \approx 23,6.$$

3. При возведении в степень в результате сохраняется столько значащих цифр, сколько их имеет возводимое в степень приближенное число:

Пример.  $(11,38)^2 = 129,5044 \approx 129,5$ .

4. При извлечении корня сохраняется столько значащих цифр, сколько их имеет подкоренное выражение:

Пример.  $\sqrt[3]{5,12} = 1,723 \approx 1,72$ .

5. При нахождении логарифма из таблиц следует брать столько знаков, сколько значащих цифр содержит данное число:

Пример.  $\lg 77,23 = 1,8878 \approx 1,888$ .

Число значащих цифр окончательного результата определяется порядком величины абсолютной погрешности. Таким образом, результат округляют до того разряда, в котором находится значащая цифра абсолютной ошибки.

Пример.  $x = 2,628 \text{ мм}$ ,  $\Delta x = 0,6 \text{ мм}$ ,  $\Rightarrow x = (2,6 \pm 0,6) \text{ мм}$ .

### **Правила построения графиков**

Во многих случаях оказывается удобным графически изображать зависимость между изучаемыми величинами. При этом необходимо руководствоваться следующими правилами.

1. При построении графика значения независимой переменной откладываются по горизонтальной оси (оси абсцисс), а значения функции – по вертикальной оси (оси ординат). В качестве независимой переменной или функции может выступать как сама функция, так и какая-либо ее степень или комбинация нескольких физических величин.

Величины, откладываемые по осям, должны указываться вместе со своими единицами измерений.

2. Исходя из пределов изменения независимой переменной и функции, необходимо выбрать независимые друг от друга масштабы по осям. График должен располагаться в центре координатной плоскости или четверти.

3. Для упрощения построения графика удобно на основании измерений составить таблицу, в которой каждому значению независимой переменной соответствует значение функции.

4. Экспериментальные точки наносятся на график с учетом погрешностей. Числовые значения экспериментальных точек и погреш-

ностей на графике не наносятся. Вспомогательные линии для построения графика, например, штрихованные, проводить нельзя, так как они ухудшают наглядность графика.

5. При построении графика следует разумно выбирать масштабы по осям так, чтобы экспериментальные точки располагались по всей координатной плоскости. Для этого, при необходимости, допускается смещение нуля по одной или обеим осям.

6. После построения экспериментальных точек проводится плавная кривая так, чтобы, по возможности, она проходила внутри интервалов погрешности. Следует заранее задуматься о виде кривой (прямая, гипербола, парабола и т.д.) исходя из известных теоретических представлений (формул).

Если какая-либо точка находится в стороне от проведенного графика, то на нее следует обратить особое внимание, возможно при данном измерении была допущена ошибка. Если это не так, то в районе этой точки искомая зависимость имеет резко выраженную особенность. Такие особенности представляют наибольший интерес. Поэтому необходимо внимательно промерить область вблизи этой точки.

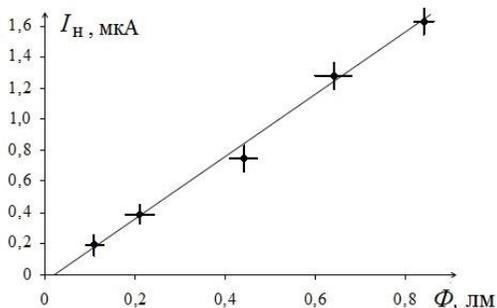


Рис. 1. График зависимости  $I_n = f(\Phi)$

**Пример.** Построим график зависимости фототока насыщения от падающего светового потока (рис.1).

В результате эксперимента получены следующие значения этих величин с соответствующими абсолютными погрешностями:

№ опыта	$I_n$ , мкА	$\Delta I_n$ , мкА	$\Phi$ , лм	$\Delta \Phi$ , лм
1	0,11	0,02	0,19	0,07
2	0,21	0,03	0,39	0,06
3	0,44	0,03	0,75	0,08
4	0,64	0,04	1,28	0,07
5	0,84	0,02	1,63	0,08

1. Нарисуем координатную плоскость.
2. Выберем масштаб таким образом, чтобы максимальное значение силы фототока насыщения было равно 0,9 мкА, а максимальное значение светового потока 1,7 лм.
3. Обозначим координатные оси.
4. Нанесем экспериментальные точки с соответствующими погрешностями.
5. Проведем экспериментальную кривую так, чтобы она не выходила за пределы погрешностей.

По графику можно определить численное значение искомой величины и ее абсолютную погрешность.

**Пример.** Определение концентрации  $C$  раствора по его оптической плотности  $D$ . В этой работе сначала измеряется оптическая плотность нескольких растворов с известной концентрацией  $C$  и на основании данных строится график зависимости  $D = f(C)$  (рис. 2). Затем измеряется величина оптической плотности  $D_x$  раствора неизвестной концентрации. Пусть она была измерена 3 раза и оказалась равной 0,76, 0,78, 0,75. Среднее значение  $D_{xcp} = 0,76$ , а средняя абсолютная ошибка  $\Delta D_{xcp} = 0,01$ . По графику находят значение концентрации  $C_{xcp}$  соответствующее среднему значению  $D_{xcp}$ . В рассмотренном случае  $C_{xcp} = 1,42\%$ . Около значения  $D_{xcp}$  на оси ординат откладывают  $\Delta D_{xcp}$ , по графику находят, какой отрезок соответствует ему на другой оси  $\Delta C_x$ . Он равен 0,02%. Окончательный результат запишется в виде  $C_{xcp} = (1,42 \pm 0,02)\%$ .

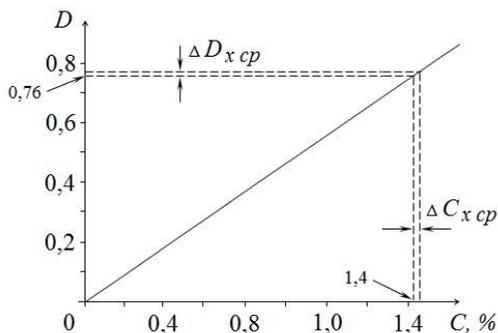


Рис. 2. Определение абсолютной погрешности графически

## Лабораторная работа № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ РАСТВОРОВ ПРИ ПОМОЩИ РЕФРАКТОМЕТРА

**Цель работы:** изучить принцип работы рефрактометра; исследовать зависимость показателя преломления раствора от концентрации; определить концентрацию сахара в растворе.

**Оборудование:** рефрактометр ИРФ-454, пипетка, растворы сахара различной концентрации, фильтровальная бумага.

#### Основные теоретические сведения

*Оптика* – раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света, а также его взаимодействие с веществом. Оптика условно делится на геометрическую, волновую и квантовую. Основу геометрической оптики составляют три закона: закон прямолинейного распространения света, закон отражения и закон преломления.

*Закон прямолинейного распространения света:* в оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно.

*Закон отражения света:* падающий и отраженный лучи (рис. 1), а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости (плоскости падения), при этом угол отражения ( $\gamma$ ) равен углу падения ( $\alpha$ ).

*Закон преломления света:* падающий и преломленный лучи (рис.1), а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения ( $\alpha$ ) к синусу угла преломления ( $\beta$ ) есть величина, постоянная для двух данных сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad (1)$$

где  $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$  – относительный показатель преломления двух сред;

$n_1$  и  $n_2$  – абсолютные показатели преломления сред.

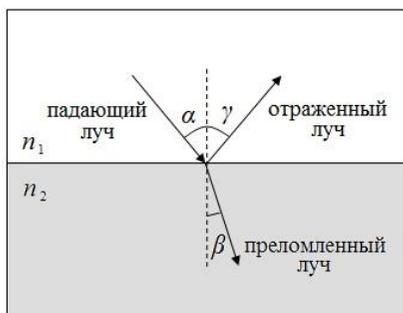


Рис. 1. Отражение и преломление света

Световым *лучом* в геометрической оптике называется линия, вдоль которой происходит распространение энергии света.

Согласно современным представлениям, явление преломления является следствием изменения скорости распространения света при переходе из одной среды в другую, а абсолютный показатель преломления равен отношению скорости света в

вакууме к скорости света в среде:  $n = \frac{c}{v}$ .

В СИ абсолютный и относительный показатели преломления не имеют единиц измерения.

При переходе света из среды с меньшим показателем преломления (*оптически менее плотная среда*) в среду с большим показателем преломления (*оптически более плотная среда*) угол падения луча больше угла преломления (рис. 2 а). Если луч падает на границу раздела сред под возможным наибольшим углом  $\alpha = 90^\circ$  (луч скользит вдоль границы раздела сред), то он будет преломляться под углом  $\beta_{пред} < 90^\circ$  (рис. 2 б). Этот угол является наибольшим углом преломления для данных сред и называется *предельным углом преломления*. Из закона преломления света следует:

$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin \beta_{пред}} = \frac{1}{\sin \beta_{пред}} = \frac{n_2}{n_1},$$

откуда

$$\sin \beta_{пред} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (2)$$

$$\beta_{пред} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad (3)$$

Если свет распространяется из оптически более плотной среды в среду оптически менее плотную ( $n_1 > n_2$ ), например, из стекла в воду, то согласно закону преломления света угол преломления будет больше угла падения (рис. 2 в). С увеличением угла падения возрастает и угол

преломления до тех пор, пока при некотором угле падения ( $\alpha = \alpha_{пред}$ ) угол преломления окажется равным  $90^\circ$  (рис.2 г). Угол  $\alpha_{пред}$  называется *предельным углом отражения*. При углах падения  $\alpha > \alpha_{пред}$  весь падающий свет полностью отражается. Это явление получило название *полного внутреннего отражения*.

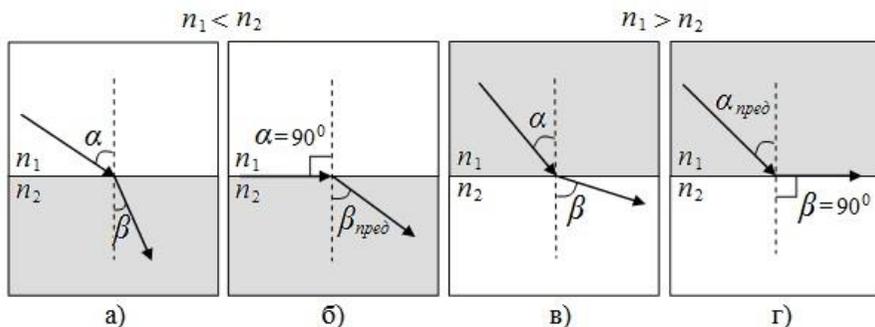


Рис. 2. Предельное преломление и полное внутреннее отражение

Используя закон преломления света легко получить условие полного внутреннего отражения. Так как

$$\frac{\sin \alpha_{пред}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}, \text{ то}$$

$$\sin \alpha_{пред} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (4)$$

$$\alpha_{пред} = \arcsin \left( \frac{n_2}{n_1} \right). \quad (5)$$

Таким образом, предельные углы преломления и полного отражения для данных сред зависят от их показателей преломления.

В геометрической оптике наряду с основными законами используется *принцип обратимости лучей*, который является их следствием: ход оптических лучей в прямом и обратном направлениях совпадает. Согласно этому принципу можно заметить, что для двух сред предельные углы преломления и отражения равны:

$$\beta_{пред} = \alpha_{пред} \quad (6)$$

Явление полного внутреннего отражения широко используется на практике в таких оптических приборах как бинокль, перископ, рефрактометр и др., а также в волоконной оптике в световодах.

## Обоснование метода

*Рефрактометрами* (от лат. refractus - преломлённый и греч. metreo - измеряю) называются приборы для измерения показателей преломления веществ (жидких, твёрдых, газообразных).

Основной частью рефрактометра являются две прямоугольные стеклянные призмы П1 и П2, изготовленные из одинакового сорта стекла (рис. 3).

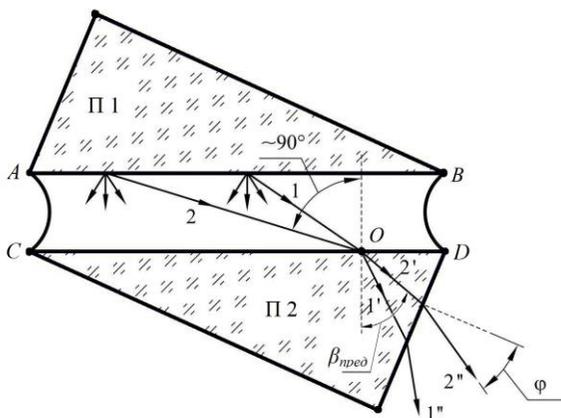


Рис. 3. Ход лучей в рефрактометре

Призмы соприкасаются гипотенузными гранями  $AB$  и  $CD$ , между которыми имеется очень тонкий зазор около  $0,1$  мм. В зазор между призмами помещают каплю жидкости, показатель преломления которой требуется определить. Луч света от источника

направляется на боковую грань верхней призмы и, преломившись, попадает на гипотенузную грань  $AB$ . Поверхность грани  $AB$  матовая, поэтому свет рассеивается и, пройдя через исследуемую жидкость, попадает на грань  $CD$  нижней призмы под разными углами от  $0^\circ$  до близких к  $90^\circ$ , преломляясь в призме П2 под углами от  $0^\circ$  до  $\beta_{пред}$  (при обязательном условии, что показатель преломления жидкости меньше показателя преломления стекла).

Как видно из рис.3 нельзя получить лучи, строго скользящие по входной грани  $CD$  измерительной призмы. Однако, так как слой жидкости очень тонок, то наблюдаемый в такой системе граничный луч в требуемых пределах точности соответствует предельному углу преломления.

Обычно измеряют угол  $\varphi$  выхода луча из призмы в воздух, зависящий от  $\beta_{пред}$ . В направлениях, заданных углами, меньшими чем  $\varphi$ , свет не распространяется. Пространство внутри этого угла будет освещенным, а вне его – темным. Таким образом, поле зрения разделя-

ется на две части: темную и светлую. Положение границы раздела света и тени определяется предельным углом преломления, жидкости и стекла, равным, согласно принципу обратимости лучей, предельному углу отражения стекла и жидкости. Таким образом измеряя угол  $\varphi$ , можно вычислить угол  $\beta_{\text{пред}} = \alpha_{\text{пред}}$ , и, зная показатель преломления призмы  $n_1$  определить показатель преломления исследуемого раствора  $n_2$ , используя формулу (4):

$$n_2 = n_1 \cdot \sin \alpha_{\text{пред}}. \quad (7)$$

В действительности при измерениях нет необходимости пользоваться этой формулой, так как отсчетная шкала рефрактометра уже проградуирована в значениях  $n_2$  с учетом соотношения (7).

### Описание установки

В работе для определения показателей преломления жидкостей используется рефрактометр ИРФ-454 (рис.5), оптическая схема которого показана на рисунке 4.

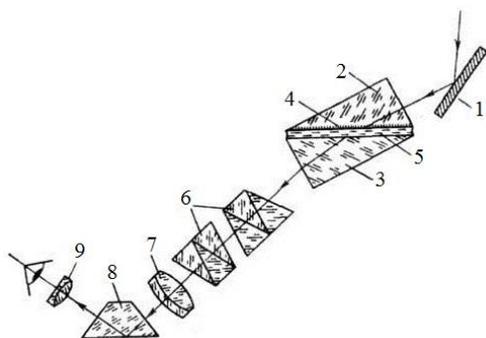


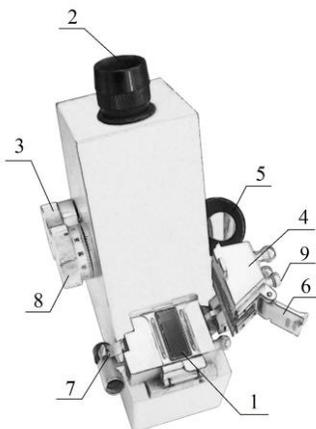
Рис.4 . Оптическая схема рефрактометра ИРФ-454

Исследуемое вещество 5 помещается в зазоре между двумя прямоугольными призмами 2 и 3. Верхняя призма 2 подвижная. Её нижняя гипотенузная грань 4 матовая. В рефрактометре используется источник белого света, направляемый зеркалом 1, поэтому вследствие зависимости показателя преломления от длины волны

(дисперсии) при прохождении светом призм 2 и 3, граница света и тени оказывается окрашенной. Во избежание этого перед объективом зрительной трубы 7 помещают компенсатор 6. Он состоит из двух одинаковых призм, каждая из которых склеена из трех призм, обладающих различными показателями преломления. Призмы подбирают так, чтобы монохроматический луч с длиной волны  $\lambda=589,3$  нм не испытывал после прохождения компенсатора отклонения. Лучи с другими длинами волн отклоняются призмами в различных направлениях. Перемещение призм компенсатора осуществляется с помощью махо-

вичка 8 (рис. 5), добиваясь того, чтобы граница света и темноты была более резкой. Изображение границы раздела свет-тьень рассматривается в окуляре 9 зрительной трубы. Призма 8 называется поворотной и используется для направления света в окуляр. Также в окуляр видна шкала на которой сразу нанесены значения показателя преломления. В общей фокальной плоскости объектива и окуляра зрительной трубы помещают стеклянную пластинку, на которую нанесена визирная линия (или крест, образованный тонкими нитями). Перемещением зрительной трубы добиваются совпадения визирной линии с границей свет-тьень и по шкале определяют показатель преломления исследуемой жидкости.

Внешний вид рефрактометра ИРФ-454 представлен на рисунке 5.



*Рис. 5. Устройство рефрактометра ИРФ-454*

- 1 – измерительная призма;
- 2 – окуляр;
- 3 – маховичок перемещения шкалы;
- 4 – осветительная призма;
- 5 – зеркало освещения поля зрения;
- 6 – заслонка осветительной призмы;
- 7 – защёлка;
- 8 – маховичок компенсатора.

## Порядок выполнения работы

1. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений:

№ раствора	C, %	№ п/п	$n_2$	$\Delta n_2$	$E_{n_2}, \%$
1	1	1			
		2			
		3			
		среднее			
2	5	1			
		2			
		3			
		среднее			
3	7	1			
		2			
		3			
		среднее			
4	X	1			
		2			
		3			
		среднее			

2. Подготовьте прибор к работе:

- а) откройте защёлку 7 и откиньте осветительную призму 4 за рукоятку 9 (рис. 5).
- б) при помощи пипетки нанесите 2-3 капли дистиллированной воды на поверхность измерительной призмы 1. Осторожно закройте ее осветительной призмой 4.
- в) направьте свет на осветительную призму при помощи заслонки 6.
- г) поворотом зеркала 5 добейтесь наилучшей освещенности поля зрения и установите окуляр 2 на отчетливую видимость шкалы и перекрестия визирных линий.
- д) вращая маховичок компенсатора 8, добейтесь полного устранения окрашенности границы раздела света и тени.

- е) с помощью маховичка перемещения шкалы 3, точно установите перекрестие на границу светлого и темного полей и произведите отсчет показателя преломления воды  $n_{\text{воды}}$  по шкале. *Отсчет должен равняться 1,333.*
- ж) осторожно удалите воду фильтровальной бумагой с поверхности призмы.

3. Пипеткой нанесите поочередно на нижнюю призму 1 растворы различной концентрации и, совмещая перекрестие с границей раздела свет-тень, определите по шкале показатели преломления  $n_2$  растворов. Запишите результаты измерений в таблицу.

*Примечание. После каждого опыта удалите раствор фильтровальной бумагой, затем протрите призмы сначала тряпочкой смоченной в воде, а затем сухой чистой тряпочкой.*

4. Для каждого раствора повторите измерение показателя преломления ещё два раза, записывая результаты в таблицу.

5. В конце опытов удалите раствор фильтровальной бумагой, затем протрите призмы сначала тряпочкой смоченной в воде, а затем сухой чистой тряпочкой. Оставьте верхнюю осветительную призму 4 в открытом положении.

### Обработка результатов измерений

1. Определите среднее значение  $n_2$  для каждого раствора. Запишите результаты в таблицу.

2. Определите относительную и абсолютную погрешности измерений  $n_2$  для каждого раствора методом среднего значения и запишите результаты в таблицу.

3. Определите средние значения относительной и абсолютной погрешностей измерений  $n_2$  для каждого раствора. Запишите результаты в таблицу.

4. Постройте график зависимости показателя преломления раствора сахара от его концентрации  $n_2 = f(C)$ .

5. Определите по графику концентрацию  $C_x$  неизвестного раствора.

6. Определите относительную и абсолютную погрешности измерений  $C_x$  графическим методом (см. пример на стр. 15).

7. Конечный результат представьте в виде:

$$C_x = (C_{\text{ср}} \pm \Delta C_{\text{ср}}) \% ; E_{C_x} = \dots \% .$$

8. Сделайте вывод, в котором охарактеризуйте, как полученный результат соответствует табличному, и какими причинами могут быть обусловлены неполные соответствия результатов (см. прил.3,4).

### **Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте основные законы геометрической оптики.
2. Что называют световым лучом?
3. Дайте понятия абсолютного и относительного показателей преломления вещества.
4. В каких единицах измеряют абсолютный и относительный показатели преломления в СИ?
5. Какой угол называется предельным углом преломления?
6. Какой угол называется предельным углом отражения?
7. В чем заключается явление полного внутреннего отражения?
8. В чём заключается принцип обратимости световых лучей?
9. Каково устройство и принцип работы рефрактометра.
10. Как по градуировочному графику определить неизвестную концентрацию раствора?
11. Где на практике можно применять рефрактометрический метод определения концентрации сахара в растворах.

### **Лабораторная работа № 2**

#### ***ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРОМ ЛИННИКА***

**Цель работы:** ознакомиться с методом определения глубины неровностей обработанных поверхностей при помощи явления интерференции.

**Оборудование:** микроинтерферометр Линника МИИ–4У, исследуемые образцы.

#### **Основные теоретические сведения**

*Оптика* – раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света, а также его взаимодействие с веществом. Оптика условно делится на геометрическую, волновую и квантовую. Волновая

оптика рассматривает световое излучение как часть широкого спектра электромагнитных волн.

*Волной* называется распространение в пространстве какого-либо повторяющегося со временем процесса (*колебательного*). *Электромагнитной волной* называется переменные магнитное и электрическое поля, взаимно порождающие друг друга и распространяющаяся в пространстве.

Для волн любой физической природы, в том числе и световых, характерны явления интерференции и дифракции.

*Интерференцией* (от лат. *inter* – между, *ferio* – ударять) *света* называется сложение в пространстве одной или нескольких когерентных световых волн, в результате которого в разных точках этого пространства наблюдаются усиления или ослабления интенсивности результирующей волны.

*Когерентностью* в наиболее общем смысле называется согласованное протекание в пространстве и во времени нескольких колебательных или волновых процессов.

Две волны являются *когерентными*, если они имеют:

- а) одинаковую физическую природу;
- б) одинаковую длину волны или частоту;
- в) фиксированную не изменяющуюся со временем разность фаз.

Интенсивность света не имеет точного определения. Этот термин применяют вместо терминов световой поток, яркость, освещенность и др. в тех случаях, когда несущественно их конкретное содержание, а нужно подчеркнуть лишь большую или меньшую их абсолютную величину. В оптике чаще всего *интенсивностью света* называют мощность излучения через поверхность единичной площади, т. е. энергию излучения, проходящую за единицу времени через поверхность единичной площади. В этом случае единица интенсивности в СИ:  $[I]=1 \text{ Вт/м}^2$  (*ватт на квадратный метр*).

Световые волны с одной единственной длиной волны называются *монохроматическими*.

Пусть в некоторой точке пространства М две монохроматические волны с циклической частотой  $\omega$  возбуждают два колебания, причём до точки М одна волна прошла в среде с показателем преломления  $n_1$  путь  $s_1$  со скоростью  $v_1$ , а вторая – в среде  $n_2$  путь  $s_2$  со скоростью  $v_2$ . Уравнения колебаний вызванных этими волнами в точке М будут иметь вид:

$$x_1 = A_1 \cdot \cos \omega \left( t - \frac{s_1}{v_1} \right); x_2 = A_2 \cdot \cos \omega \left( t - \frac{s_2}{v_2} \right).$$

*Амплитуда* (максимальное отклонение от нулевого значения) результирующего колебания определяется из выражения:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cdot \cos \delta, \quad (1)$$

где  $\delta$  – разность фаз колебаний, возбуждаемых в точке М:

$$\delta = \omega \left( \frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1} \right).$$

*Фазой* колебательного или волнового *гармонического* (изменяющегося по закону синуса или косинуса) процесса называется выражение, являющееся аргументом косинуса или синуса. Соответственно, *разность фаз* – это разность аргументов.

Известно, что для волновых и колебательных процессов интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды:

$$I = k \cdot A^2, \quad (2)$$

где коэффициент  $k$  зависит от вида и физической природы волны.

Из выражений (1) и (2) следует:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cdot \cos \delta, \quad (3)$$

Скорость электромагнитной волны в веществе:

$$v = \frac{c}{n}, \quad (4)$$

где  $c=3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме;

$n$  – абсолютный показатель преломления среды.

Используя выражение (4):

$$\delta = \omega \left( \frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1} \right) = \omega \left( \frac{s_2}{c/n_2} - \frac{s_1}{c/n_1} \right) = \frac{\omega}{c} (s_2 n_2 - s_1 n_1). \quad (5)$$

Произведение геометрической длины пути световой волны на абсолютный показатель преломления среды в которой распространяется волна называется *оптической длиной пути*:

$$L = s \cdot n. \quad (6)$$

Учитывая связь между циклической частотой ( $\omega$ ) и частотой ( $\nu$ ),  $\omega = 2\pi\nu$ , из выражений (5) и (6) получим:

$$\delta = \frac{2\pi\nu}{c} (L_2 - L_1). \quad (7)$$

Разность оптических длин путей, проходимых волнами, называется *оптической разностью хода* ( $\Delta$ ):

$$\Delta = s_2 n_2 - s_1 n_1 = L_2 - L_1. \quad (8)$$

Учитывая связь частоты ( $\nu$ ) и длины волны ( $\lambda$ ):  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , получим конечное выражение для разности фаз ( $\delta$ ) колебаний, возбуждаемых в точке М, подставляя (8) в (7):

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta. \quad (9)$$

Из выражений (9) и (3) следует, что если оптическая разность хода равна целому числу длин волн или чётному числу полуволен, т.е.  $\Delta = m\lambda = 2m \frac{\lambda}{2}$  ( $m=0,1,2,3\dots$ ), то разность фаз  $\delta=2m\pi$ , и колебания будут происходить в одинаковой фазе. В этом случае наблюдается *интерференционный максимум* (*усиление интенсивности света*).

Если оптическая разность хода равна нечётному числу полуволен:  $\Delta = (2m+1) \frac{\lambda}{2}$  ( $m=0,1,2,3\dots$ ), то при этом разность фаз  $\delta=(2m+1)\pi$  и колебания будут происходить в противофазе. В этом случае наблюдается *интерференционный минимум* (*ослабление до нулевого значения интенсивности света*).

Из выражения (3) видно, что интенсивность результирующего колебания при интерференционном максимуме больше чем суммарная интенсивность от двух колебаний ( $I > I_1 + I_2$ ) и определяется разностью фаз ( $\delta$ ), которая в свою очередь зависит от оптической разности хода двух волн согласно выражению (9). Интенсивность результирующей волны при интерференционном минимуме равна нулю и, так же зависит от разности фаз или оптической разности хода двух волн.

Пространственная интерференционная картина имеет вид чередующихся светлых и тёмных полос или светлых и тёмных колец. В случае немонохроматического света светлые полосы (кольца) оказываются радужно окрашенными, так как согласно выражению (9) условие максимума зависит от длины волны, а для света каждой длине волны соответствует свой цвет.

## Обоснование метода

На явлении интерференции основана работа измерительных приборов, получивших название *интерферометры*. Интерферометры применяются при точных измерениях длин в станкостроении и машиностроении, для определения величин неровностей на отшлифованных поверхностях, для оценки качества оптических поверхностей, для проверки оптических систем в целом.

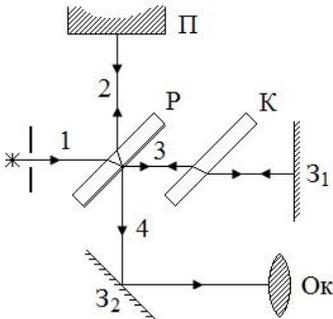


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра Линника

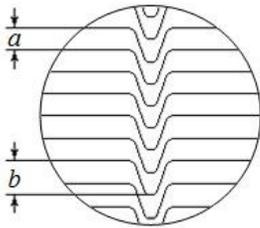


Рис. 2. Вид интерференционной картины в интерферометре Линника

Существует множество различных конструкций этих приборов, однако принцип действия всех интерферометров сводится к одному: пучок электромагнитного излучения (света, радиоволн) пространственно разделяется на два или большее количество когерентных пучков. Каждый из пучков проходит различные оптические пути и возвращается на экран, создавая интерференционную картину. Исследуя вид интерференционной картины, определяют искомые параметры, зависящие от этого вида.

В данной работе для определения чистоты обрабатываемых поверхностей и измерения глубины неровностей на них используется микроинтерферометр МИИ-4У конструкции В.П. Линника, оптическая схема которого показана на рисунке 1.

Пучок лучей света от источника падает на полупрозрачную стеклянную пластину Р и разделяется ею на два, один из которых попадает на исследуемую поверхность П, а второй – на гладкое эталонное зеркало З<sub>1</sub>. После отражения эти лучи вновь соединяются на пластинке Р и выходят из микроинтерферометра вертикально вниз. Образующаяся в результате сложения этих лучей интерференционная картина рассматривается в

окуляр Ок. Для удобства наблюдения направление интерферирующих лучей изменяется зеркальцем  $Z_2$ . Луч 2 проходит пластину Р дважды вверх и вниз. Для того, чтобы устранить возникающую при этом разность хода, на пути горизонтального луча 3 устанавливается компенсационная стеклянная пластинка К параллельно пластинке Р такой же толщины. На рисунке 1 показан только ход центральных лучей от источника. Разность хода лучей в этой схеме и вид интерференционной картины обусловлены неравенством плеч микроинтерферометра и зависят от поверхностей  $\Pi$  и  $Z_1$  и от углов, которые образуют падающие лучи с этими поверхностями. Если исследуемая поверхность обработана с высокой степенью точности, то интерференционная картина будет состоять из системы параллельных светлых и темных полос.

Темным полосам (минимумам) согласно условию минимумов соответствует оптическая разность хода лучей, равная  $\frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda$  и т.д., светлым (максимумам) –  $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda$  и т.д. Если на исследуемой поверхности имеется бороздка глубиной  $\frac{1}{2}\lambda$ , то, так как свет проходит бороздку дважды, возникает добавочная разность хода, равная  $\lambda$ . Интерференционная полоса при этом искривляется и достигает полосы, соответствующей минимуму следующего порядка (рис. 2). Аналогично искривляются все интерференционные полосы, перпендикулярные этой бороздке. В этом случае наблюдаемая величина искривления будет равна  $a$  – ширине интерференционной полосы, т.е. расстоянию между полосами. Если величина искривления равна  $Na$ , то глубина бороздки  $d = \frac{1}{2}\lambda \cdot N$ . Значение  $N$  может быть найдено как отношение величины искривления  $b$  (рис. 2) полос к расстоянию между полосами  $a$ :

$$N = \frac{b}{a}.$$

Следовательно

$$d = \frac{b}{a} \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (10)$$

## Описание установки

Внешний вид микроинтерферометра МИИ-4У представлен на рисунке 3.

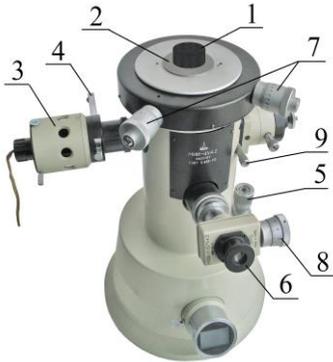


Рис. 3. Устройство микроинтерферометра МИИ-4У

- 1 – образец;
- 2 – предметный столик;
- 3 – осветитель;
- 4 – планка со светофильтрами;
- 5 – винт настройки резкости микроскопа;
- 6 – окуляр;
- 7 – винты движения предметного столика;
- 8 – винт окулярного микрометра;
- 9 – рукоятка закрытия шторки.

Исследуемый образец 1 помещается на предметный столик 2, в центре которого имеется отверстие для специального микроскопа с внутренней подсветкой. Управление резкостью микроскопа осуществляется вращением винта 5. Для наблюдения необходимой области на образце 1 столик 2 вместе с образцом при помощи микрометрических винтов 7 может совершать поступательные движения влево-вправо и вперёд-назад. Свет поступает на образец 1 по оптической схеме интерферометра (рис.1) от осветителя 3. В некоторых случаях интерференционная картина чётче видна в монохроматическом свете, поэтому на выходе осветителя 3 конструктивно предусмотрена планка с различными светофильтрами 4. Рукояткой 9 производится открытие и закрытие шторки, блокирующей пропускание света на эталонное зеркало.

Интерференционная картина наблюдается в окуляре 6 универсального окулярного микрометра МОВ-1-15. Окулярный винтовой микрометр служит для измерения параметров рассматриваемых объектов. Внутри корпуса окулярного микрометра расположены две плоскопараллельные пластинки. Неподвижная пластинка имеет восьми-миллиметровую шкалу с ценой деления 1 мм (рис.4). Подвижная шкала снабжена перекрестием и индексом в виде двух рисок (биштрихом). Шкала и перекрестие с индексом нанесены на обращенных друг к другу поверхностях пластинок и видны в поле зрения одновременно.



Рис. 4. Поле зрения в окулярном микрометре МОВ-1-15

составляет 0,01 мм или 10 мкм.

Подвижная шкала передвигается по полю зрения с помощью микрометрического винта 8 (рис.3). Барабан винта имеет сто делений. За один полный оборот винта биштрих с перекрестием перемещается на одно деление неподвижной шкалы, по которой отсчитываются целые миллиметры; дробные части отсчитываются по барабану, цена деления которого со-

### Порядок выполнения работы

1. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений:

№	$a$ , мкм	$\Delta a$ , мкм	$b$ , мкм	$\Delta b$ , мкм	$d$ , мкм	$\Delta d$ , мкм	$E_d, \%$
1							
2							
3							
Ср.							

2. Подготовьте прибор к работе, для этого:

- установите образец 1 (рис. 3) исследуемой поверхностью вниз на предметном столике 2, включите осветитель 3 и введите оранжевый светофильтр;
- закройте шторку, повернув рукоятку 8 так, чтобы стрелка-указатель стояла вертикально;
- вращением микрометрического винта 4 сфокусируйте прибор на исследуемую поверхность;
- откройте шторку, поворачивая рукоятку 8 так, чтобы стрелка-указатель стояла горизонтально, при этом в окуляре 5 должны быть видны интерференционные полосы;
- вращением винта 4 установите микроскоп на наиболее резкое изображение полос, при этом в поле зрения одновременно должны быть отчетливо видны интерференционная картина и исследуемая поверхность;

е) перемещая основание столика 2 винтами 6 найдите дефект на поверхности и добейтесь того, чтобы следы обработки (бороздки) были перпендикулярны интерференционным полосам. При необходимости дополнительно отрегулируйте резкость винтом 4;

ж) винтовой окулярный микрометр вместе с окуляром 5 и микрометрическим винтом 7 разверните так, чтобы одна из нитей перекрестия была направлена вдоль (параллельно) интерференционных полос.

3. Вращая винт 7, последовательно совместите нить перекрестия с двумя соседними тёмными полосами и по разности отсчёта микрометрического винта измерьте ширину интерференционной полосы  $a$  (см. рис. 2). Запишите значение величины  $a$  в таблицу.

4. Вращая винт 7, измерьте по разности отсчёта микрометрического винта ширину искривления изгиба  $b$  (см. рис. 2) для тех же двух тёмных полос, по которым производилось измерение величины  $a$ . Запишите значение величины  $b$  в таблицу.

5. Повторите измерения по пунктам 3 и 4 ещё два раза для любых других соседних тёмных полос.

### Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте средние значения величин  $a$  и  $b$ .

2. Определите абсолютные погрешности измерения величин  $a$  и  $b$  методом среднего значения.

3. Определите средние значения абсолютных погрешностей для величин  $a$  и  $b$ .

4. Используя выражение (10) рассчитайте для каждого опыта размер глубины бороздки  $d$ .

*Примечание. При расчетах примите  $\lambda=0,55$  мкм.*

5. Рассчитайте среднее значения глубины бороздки  $d_{cp}$ .

6. Рассчитайте относительную и абсолютную погрешности измерения глубины бороздки, используя выражения:

$$E_d = \frac{\Delta a_{cp}}{a_{cp}} + \frac{\Delta b_{cp}}{b_{cp}} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda}; \Delta d_{cp} = E_d \cdot d_{cp}.$$

*Примечание: при расчетах примите  $\Delta \lambda=0,01$  мкм.*

Запишите результаты всех вычислений в таблицу.

7. Конечный результат представьте в виде:

$$d = (d_{cp} \pm \Delta d_{cp}) \text{ мкм}; E_d = \dots\% .$$

8. Сделайте вывод, в котором охарактеризуйте точность метода и возможные области применения на практике измерения неровностей при помощи интерферометра.

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определение интерференции.
2. Какие волны называются когерентными.
3. Произведите вывод условий интерференционных максимумов и минимумов.
4. Сформулируйте и запишите условия интерференционных максимумов и минимумов.
5. Объясните возникновение интерференционной картины в виде темных и светлых полос.
6. Объясните устройство, принцип действия, назначение МИИ-4У.
7. Каким способом при работе с данным интерферометром, не внося изменений в конструкцию прибора, можно существенно повысить точность измерений?

### Лабораторная работа № 3

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ**

**Цель работы:** изучить явление дифракции света; определить длину световой волны с помощью дифракционной решетки проходящего света.

**Оборудование:** гониометр ГФ-1, дифракционная решетка, лампа накаливания.

#### **Основные теоретические сведения**

*Оптика* – раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света, а также его взаимодействие с веществом. Оптика условно делится на геометрическую, волновую и квантовую. Волновая оптика рассматривает световое излучение как часть спектра электромагнитных волн.

*Волной* называется распространение в пространстве какого-либо повторяющегося со временем (*колебательного*) процесса. *Электромагнитной волной* называется переменные магнитное и электрическое поля, взаимно порождающие друг друга и распространяющиеся в пространстве.

Одной из основных характеристик волн является длина волны.

*Длина волны* ( $\lambda$ ) – это расстояние между двумя ближайшими друг к другу точками волны, колеблющимися в одинаковых состояниях (фазах) (рис.1).

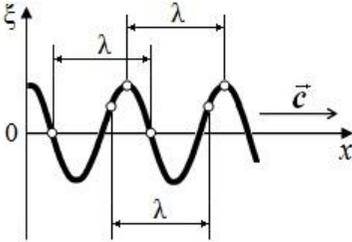


Рис.1. Длина волны

Длина волны связана с другой характеристикой – *частотой* ( $\nu$ ) соотношением:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость волны.

Так как скорость всех электромагнитных волн ( $c$ ) в вакууме одинакова  $c=3 \cdot 10^8$  м/с, то для них верно соотношение:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}. \quad (2)$$

Единица измерения длины волны в СИ 1 м (*метр*). Единица измерения частоты в СИ 1 Гц (*герц*).

Для волн любой физической природы, в том числе и световых, характерны явления интерференции и дифракции.

*Интерференцией* (от лат. inter – между, ferio – ударять) *света* называется сложение в пространстве одной или нескольких когерентных световых волн, в результате которого в разных точках этого пространства наблюдаются усиления или ослабления интенсивности результирующей волны.

*Когерентностью* в наиболее общем смысле называется согласованное протекание в пространстве и во времени нескольких колебательных или волновых процессов.

Две волны являются когерентными, если они имеют:

- а) одинаковую физическую природу;
- б) одинаковую длину волны или частоту;
- в) фиксированную, не изменяющуюся со временем разность фаз.

Световые волны с одной единственной длиной волны называются *монохроматическими*.

*Дифракцией* (от лат. diffractus – разломанный, переломанный) называется явление огибания волнами препятствий, встречающихся на их пути, и попадание в область геометрической тени.

Сущность этого явления можно объяснить с помощью *принципа Гюйгенса-Френеля*: каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных сферических волн, а огибающая этих волн задает положение волнового фронта в следующий момент времени. Вторичные волны когерентны и могут, пересекаясь, интерферировать между собой.

*Волновым фронтом* называется геометрическое место точек, до которых дошёл волновой процесс в данный момент времени.

Пусть волна от источника  $S$  падает на отверстие в непрозрачном экране (рис. 2а).

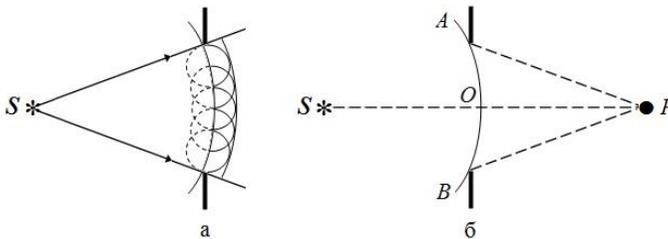


Рис.2. Принцип Гюйгенса-Френеля

Согласно Гюйгенсу, каждая точка выделяемого отверстием участка волнового фронта (рис. 2 а) служит источником вторичных волн (в однородной сферических). Построив огибающую вторичных волн для некоторого момента времени, видно, что фронт волны заходит в область геометрической тени – волна огибает края отверстия. Согласно коррекции Френеля, волновое возмущение в некоторой точке  $P$  на экране (рис. 2 б) можно рассматривать как результат интерференции (интерференционный минимум или максимум) элементарных вторичных волн, излучаемых каждым элементом некоторой волновой поверхности. На рисунке 2 б такой поверхностью является сферическая поверхность волны  $AOB$ , излучаемой точечным источником  $S$ . Результат интерференции зависит от разности фаз этих элементарных волн. Если в рассматриваемую точку  $P$  элементарные волны приходят с фазами, отличающимися на  $2\pi$  (или на  $2\pi m$ , где  $m = 0,1,2,\dots$ ), то происходит их взаимное усиление. В случае, когда волны приходят со

значениями фазы, отличающимися на  $\pi$  (или на  $\pi+2\pi m$ , где  $m = 0, 1, 2, \dots$ ), то наблюдается их взаимное ослабление.

Таким образом, дифракция – это сложное волновое явление, которое включает в себя не только огибание препятствий, но и интерференцию от вторичных волн. Это явление можно наблюдать только при определённых условиях. Главным условием наблюдения дифракции является соизмеримость размера препятствия с длиной волны.

Немецкий физик И. Фраунгофер рассмотрел дифракцию в параллельных лучах (когда источник света и точка наблюдения бесконечно удалены от препятствия, вызвавшего дифракцию). Пусть плоская монохроматическая световая волна падает нормально плоскости узкой щели (длина щели значительно больше ее ширины) шириной  $a=BC$  (рис. 3). Оптическая разность хода между крайними лучами  $BM$  и  $CN$ , идущими от щели под углом  $\varphi$  к оптической оси  $OF_0$  линзы:  $\Delta=CD=a \cdot \sin\varphi$ .

Разобьем щель  $BC$  на зоны Френеля, имеющие вид полос, параллельных ребру  $B$  щели. Ширина каждой зоны выбирается (согласно методу зон Френеля) так, чтобы разность хода от краев этих зон была равна  $\lambda/2$ . В соответствии с таким разбиением излучение всех вторичных волн от двух соседних зон будут происходить в противофазе, а соответственно при интерференции таких волн будут наблюдаться минимумы (темные участки). Как говорят, вторичные волны соседних зон «гасят» друг друга.

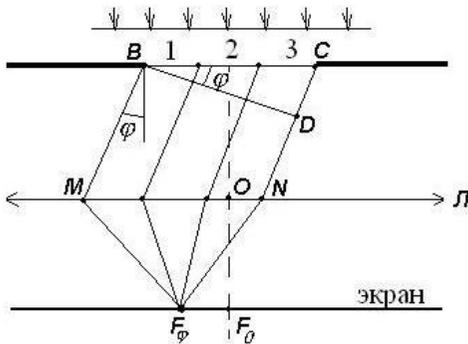


Рис.3. Дифракция Фраунгофера на одной щели

наблюдается дифракционный минимум (темная полоса).

Всего на ширине щели уместится 
$$\frac{\Delta}{\lambda/2} = \frac{a \cdot \sin\varphi}{\lambda/2}$$

зон. Если число зон четное: 
$$\frac{a \cdot \sin\varphi}{\lambda/2} = 2m$$
, все соседние зоны будут гасить друг друга. При этом оптическая разность хода между крайними лучами  $BM$  и  $CN$  равна чётному числу полуволн:

$$a \cdot \sin\varphi = 2m \frac{\lambda}{2}, m=1,2,3,\dots, \quad (3)$$

Если число зон нечетное:  $\frac{a \cdot \sin \varphi}{\lambda / 2} = (2m + 1)$ , то действие одной

из них останется непогашенным соседними. Оптическая разность хода между крайними лучами  $BM$  и  $CN$  при этом равна нечётному числу полуволн:

$$a \cdot \sin \varphi = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad m=1,2,3,\dots, \quad (4)$$

наблюдается *дифракционный максимум* (светлая полоса).

В направлении  $\varphi=0$  наблюдается центральный максимум нулевого порядка.

Более чёткую дифракционную картину, чем от одной щели, можно наблюдать на специальных приборах – *дифракционных решётках*. *Простейшая дифракционная решетка* представляет собой систему параллельных щелей, расположенных на равном расстоянии друг от друга и разделенных непрозрачными участками. Дифракционные решетки изготавливают методом нанесения тонких штрихов (царапин) на поверхности стеклянной пластинки (прозрачная решетка) или металлического зеркала (отражательная решетка). *Основными параметрами* дифракционной решетки являются период *период*  $d = a + b$ , где  $a$  – ширина щели,  $b$  – ширина непрозрачного участка между щелями (рис. 4) и число щелей приходящееся на единицу длины  $n=1/d$ .

При дифракции Фраунгофера на щели распределение интенсивности на экране определяется направлением дифрагированных лучей. Это означает, что перемещение щели параллельно самой себе влево или вправо не изменит дифракционной картины. Следовательно, если перейти от одной щели ко многим (к дифракционной решетке), то дифракционные картины, создаваемые каждой щелью в отдельности, будут одинаковыми. Дифракционная картина на решетке определяется как результат взаимной интерференции волн, идущих от всех щелей, т. е. *в дифракционной решетке осуществляется многолучевая интерференция* когерентных дифрагированных пучков света, идущих от всех щелей.

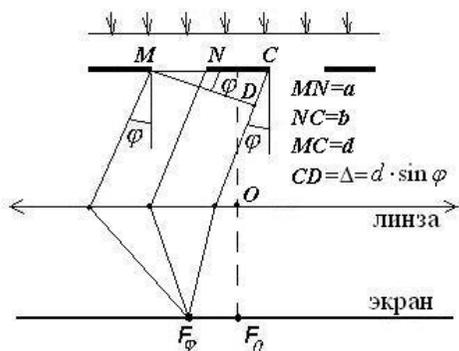


Рис. 4. Ход лучей в дифракционной Решетке

Найдем выражение для определения длины волны с помощью дифракционной решетки. Пусть плоская монохроматическая волна падает нормально к плоскости решетки (рис.4).

Так как щели находятся друг от друга на одинаковых расстояниях, то разности хода лучей, идущих от двух соседних щелей, будут для данного направления  $\varphi$  одинаковы в пределах всей дифракционной решетки:

$\Delta = CD = (a + b) \cdot \sin \varphi = d \cdot \sin \varphi$ . В тех направлениях, в которых ни одна из щелей не распространяет свет, он не будет распространяться и при двух щелях, т. е. *главные минимумы интенсивности* будут наблюдаться в направлениях, определяемых условием:

$$a \cdot \sin \varphi = 2m \frac{\lambda}{2}, m=1,2,3,\dots \quad (5)$$

Кроме того, вследствие взаимной интерференции световых лучей, посылаемых двумя щелями, в некоторых направлениях они будут гасить друг друга, т. е. возникнут дополнительные минимумы. Эти дополнительные минимумы будут наблюдаться в тех направлениях, которым соответствует разность хода лучей  $\lambda/2, 3\lambda/2, \dots$ , посылаемых, например, от крайних левых точек  $M$  и  $C$  обеих щелей. Таким образом *условие дополнительных минимумов* с учетом (5):

$$d \cdot \sin \varphi = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, m=0,1,2,3,\dots \quad (6)$$

Наоборот, действие одной щели будет усиливать действие другой, если:

$$d \cdot \sin \varphi = 2m \frac{\lambda}{2}, m=0,1,2,3,\dots \quad (7)$$

т. е. выражение (7) задает *условие главных максимумов* дифракционной решетки.

Принято считать, что оптический прибор разрешил две линии спектра, если изображения этих линий в спектре, полученном с помо-

щью данного прибора, видны раздельно. Если изображения двух линий сливаются в одно, то говорят, что прибор их не разрешил. Одни и те же линии спектра могут быть разрешены одним прибором и не разрешены другим. Это связано с шириной максимумов интенсивности этих линий.

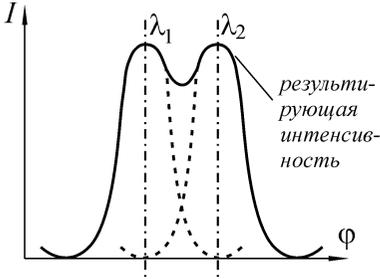


Рис. 5. Критерий Релея

По предложению Релея, принято считать разрешение полным, когда максимум интенсивности одной из линий совпадает с минимумом другой (рис.5). Это условие получило название *критерий Релея*. Если максимумы располагаются ближе, чем показанные на рисунке 5, то изображения линий  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  сливаются в одно – линии не разрешаются. *Разрешающей способностью* (раз-

решающей силой) принято называть величину  $R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$ , где  $\lambda$  – средняя

длина волны двух разрешаемых линий;  $\delta\lambda$  – наименьшая разность двух длин волн, которые ещё разрешаются данным прибором (соответствует критерию Рэлея). Разрешающая способность в СИ является величиной безразмерной. Чем она больше, тем более близкие по длине волны линии способен разрешить прибор. Разрешающая способность дифракционной решетки пропорциональна порядку спектра  $m$  и числу щелей  $N$  и определяется выражением:

$$R = m \cdot N. \quad (8)$$

### Обоснование метода

Углы, под которыми наблюдаются дифракционные максимумы всех порядков от щели и от дифракционной решетки, начиная с первого, зависят от длины волны света согласно выражениям (4) и (7). Каждой длине волны соответствует свой цвет, поэтому, если щель или дифракционную решетку освещать немонахроматическим светом, то максимумы, начиная с первого, соответствующие разным длинам волн, будут видны под разными углами и, следовательно, будут разделены на экране. Наблюдается так называемый *дифракционный спектр*. Максимум нулевого порядка расположен для всех длин волн в направлении соответствующим углу  $\varphi = 0^0$ , поэтому в спектр не разлагается.

Так как нулевой максимум расположен в центре дифракционной картины, относительно его удобно производить измерения угла дифракции для линий дифракционного спектра, находящихся в максимумах других порядков ( $m=1,2,3\dots$ ) Измеряя угол дифракции и пользуясь выражениями (4) и (7) можно определять длины волн светового излучения, соответствующие разным цветам. Однако, при дифракции света на одной щели дифракционные максимумы недостаточно резки. Более чёткая дифракционная картина получается при помощи дифракционных решеток. В этом случае для нахождения длины волны используют условие главных дифракционных максимумов дифракционной решётки (7) из которого следует:

$$\lambda = \frac{d \cdot \sin \varphi}{m}, m=0,1,2,3\dots \quad (9)$$

Таким образом, из выражения (9) видно, что для измерения длины волны света необходимо определить угол дифракции  $\varphi$  в соответствующем номере дифракционного спектра  $m$ .

### Описание установки

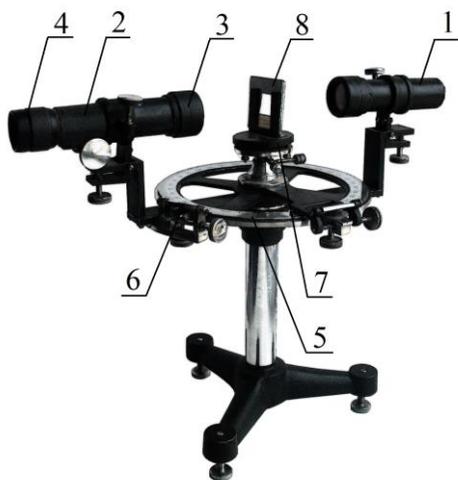


Рис. 6. Устройство гониометра

Для измерения угла дифракции  $\varphi$  применяется гониометр, устройство которого представлено на рисунке 6.

Оптическими частями гониометра являются коллиматор 1 и зрительная труба 2. Коллиматор служит для создания параллельного луча света. Он состоит из наружного тубуса с объективом и внутреннего тубуса с входной щелью, устанавливаемой в фокальной плоскости объектива. Зрительная труба 2 имеет объектив 3 и окуляр 4. Она может поворачиваться относительно лимба 5, который представляет собой горизонтально расположенный диск, на котором нанесены градусные деления. Одновременно со зрительной трубой

Одновременно со зрительной трубой

поворачивается нониус 6, закрепленный неподвижно к трубе. При помощи нониуса производится отсчет положения трубы 2 относительно лимба 5. С лимбом центрирован столик 7, на котором расположена дифракционная решетка 8.

Луч света, прошедший щель коллиматора, выходит из него параллельным пучком. Далее, проходя через дифракционную решетку и объектив зрительной трубы, лучи собираются в фокальной плоскости объектива, давая изображение щели коллиматора. В поле зрения окуляра одновременно видны вертикально расположенная визирная нить и действительное изображение щели. Перемещая зрительную трубу, можно совместить визирную нить с любым из дифракционных максимумов. В качестве источника света в работе используется лампа накаливания.

Отсчет показаний угла  $\varphi$  по шкале гониометра производится следующим образом. Градусы и минуты отсчитываются по основной шкале лимба, по делению, расположенному напротив нуля нониуса. А другое деление нониуса, совпавшее с любым делением лимба, указывает, сколько минут дополнительно надо взять по нониусу. Таким образом, для определения показания угла  $\varphi$  нужно к показанию по лимбу (в градусах и минутах) добавить показания гониометра по нониусу (в минутах).



*Рис. 7. Отсчет по шкале гониометра*

Измеряемый угол соответствует  $8^{\circ}47'$ .

На рисунке 7 показано значение угла, соответствующее 8 градусам 47 минутам. Ноль нониуса расположен левее нуля лимба на 8 полных делений и проходит малое деление, значит, показание по лимбу соответствует 8 градусам 30 минутам. В левой части нониуса с одним из делений лимба совмещается его семнадцатое деление. Значит, к имеющимся 8 градусам 30 минутам прибавляется еще 17 минут. Изме-

## Порядок выполнения работы

1. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений:

1-й порядок спектра ( $m = 1$ )								
Цвет линии	$\varphi_0$	$\varphi'_{\text{прав}}$	$\varphi'_{\text{лев}}$	$\bar{\varphi}$	$\sin \bar{\varphi}$	$\lambda,$ $10^{-9} \cdot \text{м}$	$\Delta\lambda,$ $10^{-9} \cdot \text{м}$	$E_\lambda,$ %
Фиолетовый								
Синий								
Голубой								
Зелёный								
Желтый								
Оранжевый								
Красный								
2-й порядок спектра ( $m = 2$ )								
Фиолетовый								
Синий								
Голубой								
Зелёный								
Желтый								
Оранжевый								
Красный								

2. Включите лампу накаливания и направьте свет на щель коллиматора 1 (рис.6).

3. Получите чёткую дифракционную картину (если необходимо обратитесь к преподавателю за помощью).

4. Аккуратно поворачивая зрительную трубу 2 и следя за тем, чтобы вместе с ней не поворачивался коллиматор 1, сопоставьте нить окуляра 4 зрительной трубы 2 (рис.6) с центром нулевого дифракционного максимума (не окрашен). Запишите в таблицу отсчет  $\varphi_0$  по шкале лимба и нониуса, соответствующий максимуму нулевого порядка.

5. Медленно поверните вправо зрительную трубу 2 и совместите нить с серединой фиолетовой линии в спектре первого порядка ( $m = 1$ ). Запишите показание  $\varphi'_{\text{прав}}$  по шкале лимба и нониуса в таблицу.

6. Прodelайте измерения для остальных линий спектра первого порядка указанных в таблице. Запишите соответствующие показания в таблицу.

7. Произведите измерения по пункту 5 для линий спектра первого порядка указанных в таблице, вращая зрительную трубу влево от центрального максимума. Запишите показание  $\varphi'_{лев}$  по шкале лимба и нониуса в таблицу.

8. Аналогичные измерения выполните для спектра 2-го порядка, записывая показания  $\varphi'_{прав}$  и  $\varphi'_{лев}$  по шкале лимба и нониуса в таблицу.

### Обработка результатов измерений

1. Вычислите по формулам  $\varphi_{прав} = |\varphi'_{прав} - \varphi_0|$ ;  $\varphi_{лев} = |\varphi'_{лев} - \varphi_0|$  разность отсчета, соответствующую максимуму 0-го и 1-го порядков для линий спектра указанных в таблице.

2. Вычислите по формуле  $\bar{\varphi} = \frac{\varphi_{прав} + \varphi_{лев}}{2}$  и запишите в таблицу среднее значение угла дифракции для линий спектра указанных в таблице.

3. Определите (см. прил.5) и запишите в таблицу значения синусов углов дифракции для указанных линий спектра.

4. Вычислите по формуле (9) длину волны  $\lambda$  для указанных в таблице линий спектра первого и второго порядка ( $m=1$  и  $m=2$ ). При расчетах примите  $d=10^{-5}$ м.

5. Рассчитайте относительную и абсолютную погрешности измерения каждой длины волны по формулам ( $\Delta\varphi = 1'$ ;  $\frac{\Delta d}{d} = 0,005$ ):

$$E_{\lambda} = \left( \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta\varphi}{\varphi} \right); \Delta\lambda = E_{\lambda} \cdot \lambda.$$

*Примечание.* При выводе формулы расчета относительной погрешности было учтено, что при малых углах  $\sin \varphi \approx \varphi$ .

6. Конечный результат представьте в виде:

$$\lambda = (\lambda \pm \Delta\lambda) \text{ нм}; E_{\lambda} = \dots\%$$

7. Сделайте вывод, в котором охарактеризуйте как полученные данные длин волн соответствуют табличным (см. прил. 6).

## Контрольные вопросы

1. Дайте понятие дифракции.
2. Каково главное условие наблюдения дифракции?
3. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля?
4. Каково условие разбиения на зоны Френеля?
5. Дайте определение дифракционной решетки.
6. Что называется периодом дифракционной решетки?
7. Как период дифракционной решетки связан с количеством штрихов на единицу длины решетки?
8. Объясните последовательность чередования цветов в дифракционном спектре.
9. В чем сущность критерия Релея?
10. Почему дифракционная решетка разлагает белый свет в спектр?
11. Как определить наибольший порядок спектра дифракционной решетки?

## Лабораторная работа № 4

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЕЩЕСТВА В РАСТВОРЕ ФОТОЭЛЕКТРОКОЛОРИМЕТРОМ**

**Цель работы:** изучить явление поглощения света при прохождении его через вещество; ознакомиться с устройством, принципом действия фотоэлектроколориметра и получить навыки работы с ним; определить концентрацию вещества в растворе фотометрическим методом.

**Оборудование:** фотоэлектроколориметр КФОУ-4 с принадлежностями, растворы исследуемого вещества различной концентрации.

### **Основные теоретические сведения**

При прохождении света через вещество всегда имеет место частичное его поглощение. Потеря энергии светом объясняется превращением ее в различные формы внутренней энергии вещества или энергию вторичного излучения. Поглощение света может приводить к нагреванию вещества, ионизации, возбуждению атомов и молекул. Для количественной оценки этого процесса используется понятие ин-

тенсивности света. *Интенсивность света* ( $I$ ) не имеет точного определения. Этот термин применяют вместо терминов световой поток, яркость, освещенность и др. в тех случаях, когда несущественно их конкретное содержание, а нужно подчеркнуть лишь большую или меньшую их абсолютную величину. В оптике чаще всего *интенсивностью света* называют *мощность излучения*, т. е. энергию излучения, проходящую за единицу времени через поверхность единичной площади. В этом случае в СИ единица интенсивности:  $[I] = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  (*ватт на квадратный метр*).

Поглощение света в веществе описывается законом, согласно которому интенсивность света при прохождении вещества уменьшается с расстоянием по экспоненте:

$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot x}, \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего света;

$I$  – интенсивность света, прошедшего слой вещества толщиной  $x$  (рис.1.);

$e = 2,72$  – основание натурального логарифма;

$k$  – коэффициент поглощения, зависящий от длины волны падающего света, химической природы и состояния вещества и не зависящий от интенсивности света;

Знак «-» указывает на убыль интенсивности.

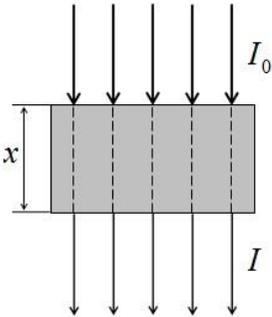


Рис. 1. Поглощение света веществом

Закон был экспериментально установлен французским ученым Пьером Бугером, позднее выведен теоретически немецким ученым Иоганном Генрихом Ламбертом и поэтому называется *законом Бугера-Ламберта*.

При  $x = \frac{1}{k}$  из формулы (1) следует, что  $\frac{I_0}{I} = e \approx 2,72$ . Таким образом, коэффициент поглощения света веществом есть величина, обратная толщине такого слоя данного вещества, при прохождении

которого интенсивность света ослабевает в  $e$  раз. В этом заключается физический смысл коэффициента поглощения. В СИ:  $[k] = \text{м}^{-1}$  (*метр в минус первой степени*).

Вещества неодинаково поглощают световую энергию. Прозрачность вещества характеризуется *коэффициентом пропускания*  $\tau$ , равным отношению интенсивности света прошедшего через данный образец, к интенсивности падающего на него света:

$$\tau = \frac{I}{I_0}. \quad (2)$$

При идеальной прозрачности, сколько света входит, столько и выходит, т. е.  $I = I_0$  и  $\tau = 1$ . Если образец совершенно не прозрачен, то на выходе  $I = 0$ , а коэффициент пропускания  $\tau = 0$ .

Коэффициент пропускания зависит от длины волны, т. е. образец может быть прозрачным для одних длин волн и непрозрачным для других. В СИ *коэффициент пропускания не имеет единиц измерения*.

Для описания поглощения света применяется также отношение  $\frac{I_0}{I}$  показывающее, во сколько раз исследуемое вещество ослабляет падающий на него световой поток. Однако при сильном поглощении ( $I \ll I_0$ ), дробь  $\frac{I_0}{I}$  принимает очень большие числовые значения. Поэтому удобнее использовать не сами значения  $\frac{I_0}{I}$ , а их логарифмы.

Величина, равная десятичному логарифму отношения интенсивности света падающего на данный образец, к интенсивности прошедшего через него света, называется *оптической плотностью*  $D$ :

$$D = \lg \frac{I_0}{I}. \quad (3)$$

С учетом выражения (2), получаем:

$$D = \lg \frac{1}{\tau} \quad \text{или} \quad D = \lg \tau^{-1} \quad (4)$$

Как и коэффициент пропускания, *оптическая плотность не имеет единиц измерения в СИ*.

Если поглотителем является раствор какого-либо вещества, то поглощение света будет зависеть от концентрации раствора  $C$ . Коэф-

коэффициент поглощения, зависит от числа молекул, расположенных в растворе на единице длины пути светового пучка, поэтому

$$k = A \cdot C, \quad (5)$$

где  $A$  – коэффициент поглощения света 1%-го раствора вещества.

Эта зависимость была экспериментально проверена немецким ученым Августом Бером и называется *законом Бера*: коэффициент поглощения разбавленного раствора пропорционален его концентрации.

В концентрированных растворах закон Бера нарушается из-за влияния взаимодействия между близко расположенными молекулами поглощающего вещества.

С учетом выражения (5) формула (1) принимает вид:

$$I = I_0 \cdot e^{-A \cdot C \cdot x}. \quad (6)$$

Зависимость (6) называется *законом Бугера-Ламберта-Бера*: интенсивность света при прохождении раствора вещества уменьшается с расстоянием по экспоненте и зависит от его концентрации.

### Обоснование метода

На явлении поглощения света основан метод определения концентрации вещества в окрашенных растворах. Для этого используются специальные приборы – фотоэлектроколориметры. Поглощение света в них обычно характеризуется оптической плотностью или коэффициентом пропускания, связанных между собой соотношением (4).

Коэффициент пропускания, согласно закону Бугера-Ламберта-Бера и с учетом выражения (2) зависит от концентрации вещества в растворе:

$$\tau = e^{-A \cdot C \cdot x}. \quad (7)$$

Рассмотрим вид этой зависимости для оптической плотности. Подставив выражение (7) в формулу (4), получаем:

$$D = \lg e^{A \cdot C \cdot x}.$$

Из математики известно, что  $\lg y = \frac{\ln y}{2,3}$  и  $\ln e^y = y$ , поэтому:

$$D = \frac{A \cdot C \cdot x}{2,3}. \quad (8)$$

Сравнение выражений (7) и (8) показывает, что оптическая плотность находится в более простой линейной зависимости от концентрации. Следовательно, взяв несколько растворов с известной кон-

центрацией, можно определить  $\tau$ , затем  $D$  и построить градуировочный график  $D = f(C)$ , позволяющий по экспериментально установленной оптической плотности определить неизвестную концентрацию вещества в растворе.

### Описание установки

Колориметры – приборы, с помощью которых производятся оптические измерения с использованием световых потоков различной длины волны. Название этих приборов происходит от латинского слова color, что в переводе на русский язык означает цвет.

КФО – колориметр фотоэлектрический однолучевой предназначен для измерения коэффициентов пропускания прозрачных сред в видимой области спектра.

Оптическая схема прибора КФО показана на рисунке 2:

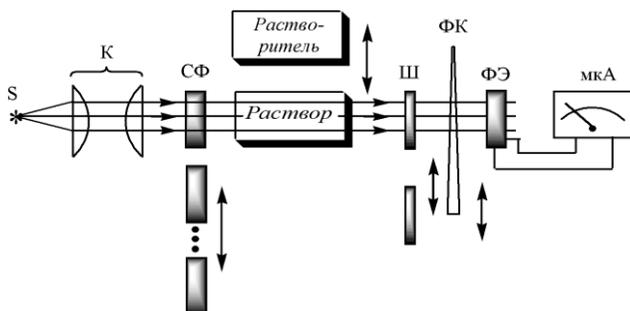


Рис. 2. Оптическая схема фотоэлектроколориметра

На этой схеме  $S$  – источник света – электрическая лампочка, нить накаливания которой имеет непрерывный спектр излучения, т.е. излучает во всем диапазоне длин световых волн.

$K$  – конденсор – система из двух плоско-выпуклых линз, с помощью которой формируется параллельный световой поток – световой луч.

Далее на пути этого луча находится светофильтр  $СФ$ . В приборе КФО имеется обойма из шести светофильтров; поворот этой обоймы и введение в световой луч нужного светофильтра осуществляется с панели прибора рукояткой «Поглотители». Каждый из светофильтров имеет свою рабочую длину волны, и сквозь него проходит наилучшим образом свет именно этой длины волны, а остальные поглощаются.

Далее по ходу луча следует кюветное отделение. Под его крышкой помещаются две кюветы. В одной из них – исследуемый раствор в другой – вещество, являющееся растворителем в этом растворе. Переключатель «Кюветы» на панели прибора имеет два рабочих положения. С его помощью в световой луч вводится нужная кювета.

При открытой крышке кюветного отделения ход рабочего светового луча на фотоэлемент перекрыт шторкой Ш. Именно в этом состоянии прибора (крышка кюветного отделения открыта, а шторка Ш, наоборот, закрыта), производится установка нуля на шкале микроамперметра мкА; для этих целей на панели прибора предусмотрена рукоятка «Установка нуля».

Далее по схеме располагается фотометрический клин ФК. Он представляет собой стеклянную пластину клиновидной формы. С помощью рукоятки «Установка 100» он может вдвигаться в рабочий световой луч, ослабляя его в большей или меньшей степени.

В фотоэлементе ФЭ энергия светового потока преобразуется в электрическую разность потенциалов. В данном приборе применен селеновый (полупроводниковый) фотоэлемент.

Заключительный элемент схемы – микроамперметр мкА. Его показания пропорциональны интенсивности светового потока, достигшего фотоэлемента.



Рис. 3. Внешний вид фотоэлектроколориметра

Внешний вид фотоэлектроколориметра и его органы управления изображены на рисунке 3:

- 1 – крышка кюветной камеры;
- 2 – рукоятка «Поглотителя»;
- 3 – рукоятка «Кюветы»;
- 4 – рукоятка «Установка 100»;
- 5 – рукоятка «Установка 0»;
- 6 – микроамперметр;
- 7 – винт корректора микроамперметра.

Тумблер включения прибора в сеть находится на его задней стенке. Принцип работы прибора заключается в измерении отношения двух световых потоков: прошедшего через растворитель (в нашем случае – воду) и прошедшего через исследуемый раствор. Каждый световой поток создаст в цепи фотоэлемента свой фототок. Отношение этих токов (или числа деле-

ний по шкале микроамперметра) будет равно коэффициенту пропускания исследуемого вещества:

$$\tau = \frac{N}{N_0},$$

где  $N$  – число делений по шкале микроамперметра при растворителе,  
 $N_0$  – число делений по шкале микроамперметра при исследуемом растворе.

С помощью фотометрического клина можно менять величину тока и для удобства отсчета установить  $N_0 = 100$ . В этом случае коэффициент пропускания исследуемого раствора будет определяться по формуле:

$$\tau = \frac{N}{100}. \quad (9)$$

### Порядок выполнения работы

1. Подготовьте таблицу для записи результатов:

Таблица 1

$C, \%$	№	$N$	$\tau$	$D$	$\Delta D$
2	1				
	2				
	3				
	среднее				
6	1				
	2				
	3				
	среднее				
8	1				
	2				
	3				
	среднее				
x	1				
	2				
	3				
	среднее				

2. До включения прибора в сеть установите минимальную чувствительность прибора, вращая ручку «Установка 100» против часовой стрелки до упора.

3. Проверьте соответствие нулевого положения стрелки микроамперметра, при необходимости отрегулируйте его винтом 7 корректора (рис. 3).

4. Введите зеленый поглотитель «3» рукояткой «Поглотители».

5. Включить прибор в сеть.

6. Откройте крышку 1 фотоэлектроколориметра и достаньте кюветодержатель.

7. Извлеките кювету «Растворитель», заполните ее на 2/3 объема водой и установите на место. Установите кюветодержатель в фотоколориметр. Крышку кюветной камеры не закрывайте.

8. Рукояткой 3 «Кюветы» расположите кювету с растворителем на пути светового потока.

9. Установите нуль по шкале микроамперметра рукояткой 5 «Установка 0».

10. Закройте крышку 1 кюветного отделения и рукояткой 4 «Установка 100» установите стрелку микроамперметра на сотое деление.

11. Откройте крышку 1 кюветной камеры и достаньте кюветодержатель. Извлеките пустую кювету, заполните ее на 2/3 объема исследуемым раствором наименьшей концентрации и установите на место.

12. Поставьте кюветодержатель в фотоколориметр. Рукояткой 3 «Кюветы» расположите кювету с исследуемым раствором на пути светового потока. Закройте крышку кюветной камеры.

13. Произведите отсчет по шкале микроамперметра  $b$  и запишите  $N$  в таблицу 1.

14. Откройте крышку 1 кюветной камеры и достаньте кюветодержатель. Извлеките кювету с исследуемым раствором и слейте его в баночку с раствором той же концентрации. Протрите кювету, заполните ее на 2/3 объема следующим раствором и установите на место.

15. Поставьте кюветодержатель в фотоколориметр. Рукояткой 3 «Кюветы» расположите кювету с исследуемым раствором на пути светового потока. Закройте крышку кюветной камеры.

16. Произведите отсчет по шкале микроамперметра  $b$  и запишите  $N$  в таблицу 1.

17. Прделайте пункты 14 – 16 с остальными растворами.

18. Проведите еще две серии опытов по пунктам 14 – 16 со всеми растворами, начиная с раствора наименьшей концентрации. Не забудьте слить последний раствор.

19. Выключите прибор из сети.

### Обработка результатов измерений

1. По значениям  $N$  для всех опытов определите  $\tau$ , используя формулу (9). Запишите результаты в таблицу 1.

2. По таблице 2 определите  $D$  для всех  $\tau$  (см. прим.) и ее среднее значение, результаты занесите в таблицу 1.

Таблица 2

$D$	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	1,000	0,977	0,955	0,933	0,913	0,891	0,871	0,851	0,832	0,813
0,1	0,794	0,776	0,759	0,741	0,724	0,708	0,692	0,676	0,661	0,646
0,2	0,631	0,617	0,603	0,589	0,575	0,562	0,549	0,537	0,525	0,513
0,3	0,501	0,490	0,475	0,468	0,457	0,447	0,437	0,427	0,417	0,407
0,4	0,398	0,389	0,380	0,371	0,363	0,355	0,347	0,339	0,331	0,324
0,5	0,316	0,309	0,302	0,295	0,288	0,282	0,275	0,269	0,263	0,257
0,6	0,251	0,245	0,240	0,234	0,229	0,224	0,219	0,214	0,209	0,204
0,7	0,199	0,195	0,191	0,186	0,182	0,178	0,174	0,170	0,166	0,162
0,8	0,158	0,155	0,151	0,148	0,145	0,141	0,138	0,135	0,132	0,120
0,9	0,126	0,123	0,120	0,117	0,115	0,112	0,110	0,107	0,105	0,102
1,0	0,100	0,098	0,095	0,093	0,091	0,089	0,087	0,085	0,083	0,081

*Примечание.* В первом столбце таблицы даны значения оптической плотности  $D$  через 0,1, а в верхней строке помещены ее сотые доли. На пересечении строки со столбцом приводятся соответствующие значения коэффициента пропускания. При отыскании значений оптической плотности, соответствующих значениям коэффициентов пропускания, меньших 0,081, сначала увеличьте данный коэффициент пропускания в 10 раз, затем найдите значение оптической плотности, соответствующее полученному коэффициенту пропускания, и к этому значению прибавьте единицу.

3. Рассчитайте для всех значений  $D$  ее абсолютную погрешность по формуле  $\Delta D = |D_{cp} - D_{изм}|$ , найдите среднее значение  $\Delta D$ , результаты занесите в таблицу 1.

*Примечание.* Если в результате расчета абсолютной погрешности оптической плотности получается нуль, то примите  $\Delta D = 0,01$ .

4. По средним значениям оптической плотности  $D_{cp}$  для всех известных концентраций с учетом абсолютной ее погрешности постройте градуировочный график  $D = f(C)$ .

5. Отметьте на графике точку, соответствующую среднему значению оптической плотности раствора неизвестной концентрации.

6. Отметьте на графике интервал средней абсолютной погрешности оптической плотности раствора неизвестной концентрации.

7. Определите по графику значение концентрации раствора  $C_x$ , опустив перпендикуляр на соответствующую координатную ось.

8. Определите по графику абсолютную погрешность концентрации раствора (см. пример на стр. 15).

9. Определите относительную погрешность определения концентрации неизвестного раствора по формуле:

$$E_{C_x} = \frac{\Delta C_x}{C_x} \cdot 100\% .$$

10. Результат запишите в виде:  $C = (C_x \pm \Delta C_x) \%$ ,  $E_{C_x} = \dots\%$ .

11. Сделайте вывод по результатам работы.

### Контрольные вопросы

1. Что называется явлением поглощения света веществом?

2. Что такое интенсивность света? В каких единицах она измеряется?

3. Каким законом описывается явление поглощения света веществом? Сформулируйте его и запишите математически.

4. В чем заключается физический смысл коэффициента поглощения? В каких единицах он измеряется и как обозначается?

5. Что называется коэффициентом пропускания? В каких единицах он измеряется и как обозначается?

6. Что такое оптическая плотность? В каких единицах она измеряется и как обозначается?

7. Сформулируйте и запишите закон Бера.

8. Сформулируйте и запишите закон Бугера-Ламберта.

9. Изобразите оптическую схему фотоэлектроколориметра и расскажите назначение его основных частей.

10. В чем заключается метод определения концентрации вещества в растворе фотоэлектроколориметром.

## Лабораторная работа № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ САХАРА В РАСТВОРЕ САХАРИМЕТРОМ

**Цель работы:** изучить общие закономерности поляризации света; ознакомиться с устройством и принципом работы сахариметра; определить концентрацию сахара в растворе и удельную постоянную вращения сахара.

**Оборудование:** сахариметр, кюветы с растворами сахара.

#### Основные теоретические сведения

Световое излучение является частью широкого спектра электромагнитных волн. *Электромагнитной волной* называется переменное магнитное и электрическое поля, взаимно порождающих друг друга и распространяющаяся в пространстве. Из электромагнитной теории света следует, что световые волны *поперечны*. В каждой точке на линии распространения такой волны, перпендикулярно направлению её распространения (поперёк) совершают колебания две *векторные характеристики*: напряженность электрического поля  $\vec{E}$  и индукция магнитного поля  $\vec{B}$ . Векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  взаимно перпендикулярны между собой (рис. 1).

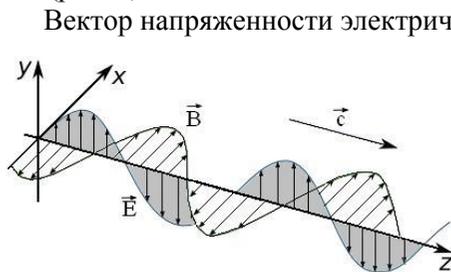


Рис. 1. Схема электромагнитной волны

Вектор напряженности электрического поля называют *световым вектором*, так как физиологическое, фотохимическое, фотоэлектрическое и другие действия света вызываются колебаниями этого вектора. Глаз человека так же воспринимает только электрическую составляющую электромагнитной световой волны.

Свет представляет собой суммарное электромагнитное излучение множества атомов источника света. Атомы излучают световые волны независимо друг от друга, поэтому световая волна, излучаемая телом в целом, характеризуется всевозможными равновероятными ко-

лебаниями светового вектора. Свет со всевозможными направлениями колебаний светового вектора называется *естественным* (рис. 2 а).

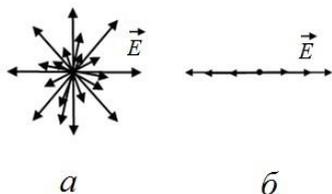


Рис. 2. Колебания светового вектора в естественном (а) и поляризованном (б) свете

происходят колебания светового вектора, называется *плоскостью поляризации* (рис.3).

Поляризация света происходит при отражении света от поверхности диэлектриков, при преломлении в них, а также при прохождении света через некоторые кристаллы (кварца, турмалина, исландского шпата). Эти вещества, названные *поляризаторами (поляроидами)*, пропускают колебания, параллельные только одной плоскости (плоскости поляризации), и полностью задерживают колебания, перпендикулярные этой плоскости.

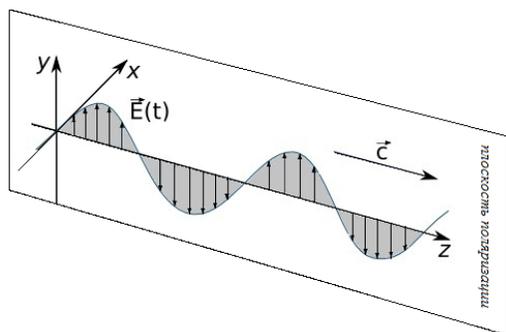


Рис. 3. Поляризованная волна и плоскость поляризации

Солнце, лампы накаливания, ртутные лампы, лампы дневного света являются источниками естественного света. Свет, в котором направления колебаний светового вектора упорядочены каким-либо образом, называется *поляризованным* (рис 2 б). Если колебания светового вектора происходят только в одной плоскости, свет называют *плоскополяризованным*. Плоскость, в которой

При попадании естественного света на границу диэлектриков (рис. 4) преломленный и отраженные световые волны оказываются частично поляризованными.

Степень поляризации отраженного луча меняется при изменении угла падения. Существует угол

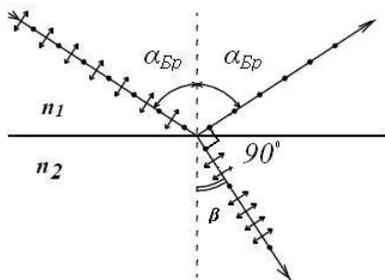


Рис. 4. Поляризация света при отражении и преломлении

Угол Брюстера можно определить по *одноименному закону Брюстера*: если угол падения равен углу Брюстера, то отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны, при этом тангенс угла полной поляризации равен отношению абсолютного показателя преломления второй среды к абсолютному показателю преломления первой:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{Бр}} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1)$$

где  $n_2$  и  $n_1$  – абсолютные показатели преломления второй и первой сред соответственно.

Глаз не отличает естественный свет от поляризованного, поэтому поляризованный свет обнаруживается по явлениям, свойственным только ему. Поляризованный свет можно определить при помощи обычного поляризатора. Поляризаторы, предназначенные для исследования поляризованного света, называются анализаторами, т.е. один и тот же поляроид можно использовать и как поляризатор, и как анализатор.

Поляризация света в поляроидах подчиняется *закону Малюса*: если естественный свет проходит через два поляризующих прибора, плоскости поляризации которых располагаются друг к другу под углом  $\alpha$ , то интенсивность света, пропущенного такой системой (рис. 5) будет пропорциональна  $\cos^2 \alpha$ , при этом в первом поляризаторе свет теряет половину своей интенсивности:

$$I = \frac{1}{2} \cdot I_{\text{ест}} \cdot \cos^2 \alpha = I_0 \cdot \cos^2 \alpha, \quad (2)$$

где  $I$  – интенсивность поляризованного света, прошедшего поляризатор и анализатор;

$I_{\text{ест}}$  – интенсивность естественного света;

падающего, при котором отраженный луч оказывается полностью поляризованным, а преломленный максимально возможно. Этот угол падения называется *углом полной поляризации* или *углом Брюстера*  $\alpha_{\text{Бр}}$ .

Угол Брюстера можно определить по *одноименному закону Брюстера*:

если угол падения равен углу Брюстера, то

отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны, при

этом тангенс угла полной поляризации равен отношению абсолютного

показателя преломления второй среды к абсолютному показателю

преломления первой:

$I_0$  – интенсивность поляризованного света, прошедшего поляризатор;  
 $\alpha$  – угол между плоскостями поляризации анализатора и поляризатора.

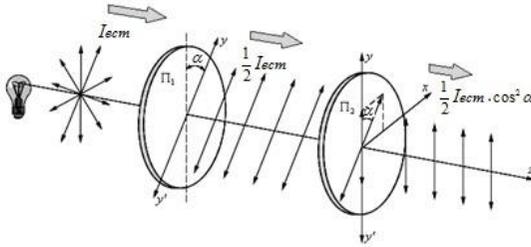


Рис 5. Прохождение света через систему поляризатор-анализатор

Если плоскости поляризации анализатора и поляризатора параллельны ( $\alpha=0, \pi, 2\pi$ ), то из закона Малюса следует, что через анализатор проходит свет максимально возможной интенсивности. Если плоскости поляризации анализатора и поляризатора перпендикулярны ( $\alpha=\pi/2, 3\pi/2$ ), то через анализатор свет проходить не будет совсем.

Интенсивность света не имеет точного определения. Этот термин применяют вместо терминов световой поток, яркость, освещенность и др. в тех случаях, когда несущественно их конкретное содержание, а нужно подчеркнуть лишь большую или меньшую их абсолютную величину. В оптике чаще всего *интенсивностью света* называют мощность излучения через поверхность единичной площади, т. е. энергию излучения, проходящую за единицу времени через поверхность единичной площади. В этом случае единица интенсивности в СИ:  $[I]=1 \text{ Вт/м}^2$  (*ватт на квадратный метр*).

При прохождении поляризованного света через некоторые кристаллы (кварц, киноварь и другие), а так же через растворы сахара, мочевины, белков плоскость колебаний поворачивается на некоторый угол  $\varphi$ . Это явление называется *вращением плоскости колебаний поляризованного света*. Вещества, вращающие плоскость поляризации, называются *оптически активными*.

Для большинства оптически активных кристаллов обнаружено существование двух модификаций, осуществляющих вращение плоскости поляризации по часовой стрелке (правовращающие) и против (левовращающие) для наблюдателя, смотрящего навстречу лучу.

В растворах угол поворота плоскости поляризации пропорционален толщине раствора и концентрации оптически активного вещества:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot l \cdot C, \quad (3)$$

где  $\varphi_0$  – удельная постоянная вращения;

$l$  – толщина раствора;

$C$  – концентрация оптически активного вещества.

*Физический смысл* удельной постоянной вращения заключается в том, что она показывает, на какой угол поворачивает плоскость поляризации оптически активное вещество единичной концентрации при прохождении светом единичной длины. В общем случае она зависит от температуры раствора и от длины волны проходящего через раствор света.

Единица измерения удельной постоянной вращения в СИ:  $[\varphi_0]=1$  рад/м·% (*радиан на метр-процент*).

В производстве широко используется Международная сахарная шкала, в которой  $100\text{ }^\circ\text{S}=34,62\text{ }^\circ$  угловым. С учетом этого единица измерения удельной постоянной вращения может быть представлена в виде:  $[\varphi_0]=1\text{ }^\circ\text{S} / \text{м}\cdot\%$  (*градус сахарной шкалы на метр-процент*).

### Обоснование метода

Явление вращения плоскости колебаний поляризованного света используется для определения концентрации оптически активного вещества в растворах при помощи приборов, называемых *поляриметрами*. Поляриметры, шкала которых проградуирована в единицах Международной сахарной шкалы, называются *сахариметрами*.

Определение концентрации растворов сахара при помощи поляриметров и сахариметров применяется при исследованиях в сельском хозяйстве, в лабораториях химической, пищевой, нефтяной промышленности.

Простейший поляриметр (рис. 6) состоит из двух поляризаторов, источника света и устройства для измерения угловых величин.

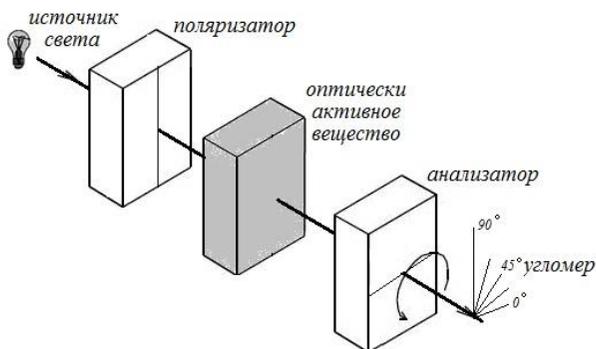


Рис. 6. Схема простейшего поляриметра

Поляризаторы перед началом измерений устанавливают таким образом, чтобы их плоскости поляризации были взаимно перпендикулярны. При этом свет через систему поляризатор-анализатор не проходит, и наблюдатель видит темноту. Если между двумя поляризаторами поместить оптически активное вещество, то поле зрения просветляется. Это происходит потому, что активное вещество поворачивает плоскость поляризации света, вышедшего из первого поляризатора на угол  $\varphi$ . В результате, часть света проходит анализатор, и наблюдатель может это заметить. Чтобы снова получить темноту, нужно повернуть анализатор против направления вращения плоскости поляризации на угол равный углу вращения  $\varphi$ . Угол поворота анализатора легко поддаётся измерению. Зная удельную постоянную вращения вещества и толщину раствора оптически активного вещества, можно по формуле 3 определить концентрацию раствора.

Часто при измерениях концентрации оптически активных веществ в растворах удельная постоянная вращения неизвестна. В этом случае взяв раствор известной концентрации  $C_{изв}$  этого же вещества, определяют поляриметром угол поворота плоскости поляризации этим раствором  $\varphi_{изв}$ , а удельную постоянную вращения  $\varphi_o$  вычисляют из формулы (3):

$$\varphi_o = \frac{\varphi_{изв}}{C_{изв} \cdot l}; \quad (4)$$

Для нахождения концентрации неизвестного раствора  $C_x$ , с помощью поляриметра определяют угол вращения плоскости поляризации света этим раствором  $\varphi_x$ . Используя формулы (3) и (4), при условии равенства толщин растворов  $l$ , определяют  $C_x$  по формуле:

$$C_x = C_{изв} \cdot \frac{\varphi_x}{\varphi_{изв}} \quad (5)$$

При таком определении концентрации неизвестного раствора, как видно из формулы (5), знание численного значения удельной постоянной вращения и толщины слоя, вращающего плоскость поляризации вещества, необязательно.

### Описание установки

В работе для определения удельной постоянной вращения сахара и его концентрации в растворе используется сахариметр универсальный СУ-4. Принципиальная схема сахариметра представлена на рисунке 7.

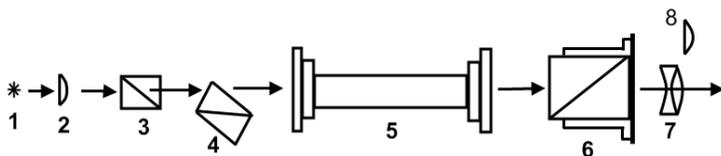


Рис. 7. Принципиальная схема полутеневого сахариметра

Исследуемое вещество 5 помещается между полутеневым поляризатором, состоящим из двух половин 3 и 4, и анализатором 6. Пропускание анализатора меняется в соответствии с законом Малюса при изменении угла между плоскостью поляризации анализатора 6 и плоскостью поляризации падающего на него света.

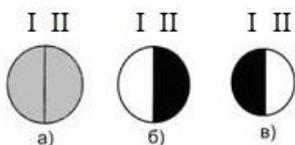


Рис. 8. Вид поля зрения в сахариметре с полутеневым поляризатором

(рис. 8а). Глаз человека очень чувствителен к нарушениям равенства освещенностей двух соседних полей (рис. 8 б, в), поэтому с помощью полутеневого устройства положение плоскости поляризации может быть установлено с гораздо большей точностью, чем путем установки поляризатора на темноту.

Использование полутеневого поляризатора 3 и 4 обусловлено тем, что установка обычного поляризатора на темноту не может быть осуществлена достаточно точно. В полутеневых поляризаторах производится установка не на темноту, а на равенство освещенностей двух половин полей зрения I и II

Измерение угла вращения сводится к повороту плоскости поляризации анализатора до визуального выравнивания яркостей двух половин поля зрения I и II (рис. 8 а), наблюдаемых в зрительную трубу 7 (рис. 7). Измеряемый угол считывается со шкалы отсчётного устройства 8. Конденсор 2 служит для создания параллельного пучка света от источника 1.

Перемещение двух половин поляризатора 3 и 4 (рис. 7) друг относительно друга фиксируется по отсчитывающему устройству, проградуированному в единицах Международной сахарной шкалы.

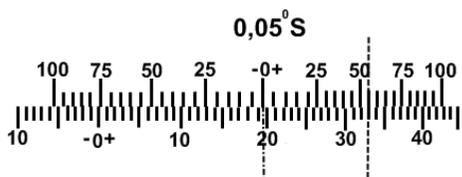


Рис. 9. Снятие показаний с отсчитывающего устройства сахариметра

отсчету  $+19,55^{\circ}\text{S}$  (нуль нониуса расположен правее шкалы на 19 полных делений, и в правой части нониуса с одним из делений шкалы совмещается его одиннадцатое деление. Цена деления нониуса  $0,05^{\circ}\text{S}$ . На шкале нониуса (верхняя шкала) указаны уже сотые доли градуса.

Внешний вид сахариметра СУ-4 и его органы управления изображены на рисунке 10.

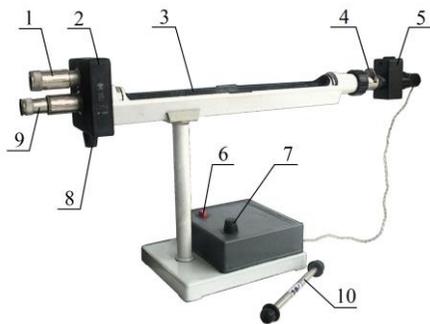


Рис. 10. Устройство сахариметра СУ-4

Снятие показаний по отсчитывающему устройству поясняется на рисунке 9. Градусы отсчитываются по основной нижней шкале (лимбу), десятые и сотые доли – по нониусу, расположенному над основной шкалой. На рисунке 9 показано положение основной шкалы и нониуса, соответствующее

- 1 – окуляр отсчитывающего устройства;
- 2 – измерительная головка;
- 3 – кюветное отделение;
- 4 – поворотная обойма;
- 5 – осветительный узел;
- 6 – кнопка выключателя;
- 7 – ручка резистора;
- 8 – рукоятка клинового компенсатора;
- 9 – зрительная труба;
- 10 – кювета с раствором.

## Порядок выполнения работы

1. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений:

№ п/п	$\varphi_{изв},$ °S	$\Delta\varphi_{изв},$ °S	$\varphi_x,$ °S	$\Delta\varphi_x,$ °S	$C_x,$ %	$\Delta C_x,$ %	$E_{C_x},$ %	$\varphi_0,$ °S/м.°	$\Delta\varphi_0,$ °S/м.°	$E\varphi_0,$ %
1										
2										
3										
4										
5										
Ср.										

2. Подготовьте установку к работе:

- а) установите ручку резистора 7 (рис. 10) в крайнее положение вращением против часовой стрелки до упора;
- б) включите шнур электропитания сахариметра в сеть;
- в) включите кнопкой 6 осветитель;
- г) установите обойму 4 в положение «С» (светофильтр);
- д) установите окуляр зрительной трубы 9 на максимальную резкость изображения вертикальной линии раздела полей сравнения;
- е) установите окуляр отсчетного устройства 1 на максимальную резкость изображения штрихов и цифр шкалы и нониуса;
- ж) установите ручкой резистора 7 такую яркость поля зрения, при которой наиболее четко воспринимается разница в яркости полей сравнения, если сместить нониус на одно деление с нулевого положения.

3. Смотря в окуляр отсчитывающего устройства 1 проверьте нулевой отсчет, при необходимости совместите нулевое деление основной шкалы с нулевым делением нониусной шкалы, вращением рукоятки клинового компенсатора 8.

4. Установите кювету с раствором известной концентрации в кюветное отделение 3.

5. Вращением рукоятки клинового компенсатора 8 против часовой стрелки уравнивайте яркость полей сравнения согласно рисунку 8 а.

6. Произведите отсчет показаний по шкале и нониусу согласно рисунку 9.

7. Запишите значение  $\varphi_{изв}$  в таблицу.
8. Установите кювету с раствором неизвестной концентрации в кюветное отделение 3.
9. Вращением рукоятки клинового компенсатора 8 против часовой стрелки уравняйте яркость полей сравнения согласно рисунку 8 а.
10. Произведите отсчет показаний по шкале и нониусу согласно рисунку 9.
11. Запишите значение  $\varphi_x$  в таблицу.
12. Повторите измерения по пунктам 3-11 ещё 4 раза.

### Обработка результатов измерений

1. По формуле (5) определите  $C_x$  для каждого опыта.
2. Определите среднее значение  $\varphi_{изв}$ ,  $\varphi_x$ ,  $C_x$ .
3. Определите  $\Delta\varphi_{изв}$  и  $\Delta\varphi_x$  методом среднего значения.
4. Определите относительную и абсолютную погрешности измерений  $C_x$  по формулам:

$$E_{C_x} = \frac{\Delta\varphi_{изв}}{\varphi_{изв}} + \frac{\Delta\varphi_x}{\varphi_x}; \quad \Delta C_x = E_{C_x} \cdot C_x.$$

5. Запишите результаты в таблицу.
6. По формуле (4) определите  $\varphi_0$  для каждого опыта. При расчетах примите  $l=0,189$  м.
7. Определите среднее значение  $\varphi_0$ .
8. Определите относительную и абсолютную погрешности измерений  $\varphi_0$  по формулам:

$$E_{\varphi_0} = \frac{\Delta\varphi_{изв}}{\varphi_{изв}} + \frac{\Delta l}{l}; \quad \Delta\varphi_0 = E_{\varphi_0} \cdot \varphi_0.$$

При расчетах примите  $\Delta l=0,001$  м.

9. Запишите результаты в таблицу.
10. Конечный результат представьте в виде:

$$C_x = (C_{xcp} \pm \Delta C_{xcp}) \%;$$

$$E_{C_x} = \dots \%$$

$$\Delta\varphi_0 = (\varphi_{0cp} \pm \Delta\varphi_{0cp}) \text{ } ^\circ\text{S/м}\cdot\text{ } \%;$$

$$E_{\varphi_0} = \dots \%.$$

11. Сделайте вывод по проделанной работе.

## Контрольные вопросы

1. Поляризацией света называется...?
2. В чем отличие естественного и поляризованного света?
3. Как отличить естественный свет от поляризованного?
4. Укажите способы получения поляризованного света.
5. Какой угол называется углом Брюстера?
6. Сформулируйте и запишите закон Малюса.
7. Вращением плоскости поляризованного света называется...?
8. От чего зависит угол поворота плоскости поляризации?
9. Какие вещества называются оптически активными?
10. От каких параметров зависит угол поворота плоскости поляризации?
11. Какие явления положены в основу поляриметра?
12. Расскажите принцип действия поляриметра.
13. В чем отличие поляриметра и сахариметра?
14. Что называют интенсивностью света, и в каких единицах она измеряется в СИ?

## Лабораторная работа № 6

### ***ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ ИСПУСКАНИЯ НАГРЕТЫХ ТЕЛ***

**Цель работы:** изучить линейчатый спектр испускания ртути, определить неизвестное вещество методом спектрального анализа.

**Оборудование:** монохроматор универсальный УМ-2, ртутная лампа ПРК, лампа с исследуемым излучением.

### **Основные теоретические сведения**

*Спектром испускания* называется совокупность длин волн (частот), на которые может быть разложено сложное излучение, испускаемое веществом. *Излучение* – это процесс испускания и распространения энергии в виде волн и частиц.

Спектры испускания образуются в результате перехода электронов в атомах с одного уровня энергии на другой.

Состояние электрона в атоме описывается уравнением Шредингера. Применение его к атому водорода позволяет получить выражение для возможных значений энергии:

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (1)$$

где  $m$ ,  $e$  – масса и заряд электрона;

$h$  – постоянная Планка;

$\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;

$n = 1, 2, 3, \dots$  – главное квантовое число (номер орбитали электрона).

Знак минус появляется в связи с соглашением о том, что энергия электрона на больших расстояниях от ядра равна нулю.

Выражение (1) позволяет определять энергию электрона в стационарных состояниях, т. е. состояниях, в которых атом не излучает.

Чтобы атом начал излучать, его надо перевести в *возбужденное* состояние. Для перевода атома в возбужденное состояние ему необходимо сообщить энергию. Переход атома в стационарное состояние с меньшей энергией будет сопровождаться излучением кванта, определяемого выражением:

$$h\nu = E_m - E_n, \quad (m > n) \quad (2)$$

где  $\nu$  – частота излучения;

$E_n$  и  $E_m$  – энергия уровней с номерами  $n$  и  $m$ .

*Квантом* называется минимальная порция энергии, которой обладает световая частица – *фотон*.

Подставив значения энергии из выражения (1) в (2), получим формулу, позволяющую рассчитать значение энергии фотонов в спектре излучения атома водорода:

$$h\nu = \frac{m_e e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2} \cdot \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (m > n) \quad (3)$$

или (с учетом  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , где  $c$  – скорость света в вакууме) возможные значения соответствующих длин волн ( $\lambda$ ):

$$\frac{1}{\lambda} = R_\lambda \cdot \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (4)$$

где  $R_\lambda = \frac{m_e e^4}{8h^3 \varepsilon_0^2 c}$  – постоянная Ридберга для атома водорода.

Полученное выражение (4) называется формулой Бальмера. Численное значение постоянной Ридберга в СИ:  $R_\lambda = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  (*метр в минус первой степени*).

Подставляя различные значения  $n$  и  $m$  в формулу (4), можно рассчитать все длины волн излучения водородоподобных атомов (т.е. атомов и ионов с одним электроном). При этом длины волн образуют *спектральные серии*, соответствующие каждому значению  $n$ .

Серия спектральных линий, отвечающих значению  $n = 1$ , называется серией Лаймана. Линии этой серии расположены в ультрафиолетовой области спектра электромагнитных излучений.

При  $n = 2$  различные значения  $m$  дают длины волн, большинство из которых расположено в видимой области спектра. Эта серия называется серией Бальмера.

Линии остальных серий (для  $n = 3, 4, 5, \dots$ ) лежат в инфракрасной области спектра и называются сериями Пашена, Брэкетта, Пфунда соответственно.

Набор уровней энергии может быть показан на энергетической диаграмме (рис. 1). По вертикали откладываются дискретные значения энергий  $E_n$ . Горизонтальные прямые фиксированных значений  $E_n$  обозначают скачкообразные переходы электрона в атоме из одного стационарного состояния в другое. Стрелки вниз означают испускание кванта света с соответствующим уменьшением энергии атома.

Спектральные переходы возможны строго между определенными уровнями энергии. Никаких промежуточных переходов в атоме быть не может, т. е. не может быть и квантов света с промежуточными значениями энергии, а значит и промежуточных значений частот.

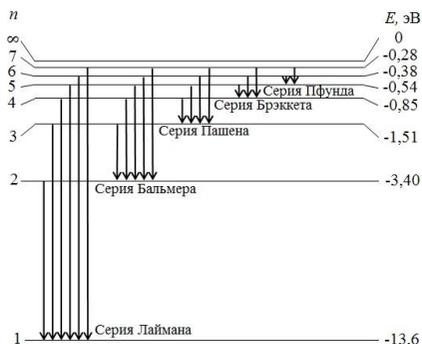


Рис. 1. Энергетическая диаграмма электронных переходов

Атом водорода является наиболее простым атомом. Спектры излучения других атомов могут также быть разделены на серии, однако закономерности, которым они подчиняются, гораздо сложнее.

Спектры испускания делятся на линейчатые, полосатые и сплошные.

*Линейчатые спектры* испускают возбужденные атомы газов и паров металлов. Они состоят из резко очерченных цветных линий, разделенных темными промежутками.

*Полосатые спектры* испускаются возбужденными молекулами веществ. Они похожи на линейчатые, но вместо линий наблюдаются цветные полосы, занимающие некоторый диапазон длин волн.

Нагретые до высокой температуры твердые тела излучают во всем диапазоне длин волн и дают *сплошной спектр*.

### **Обоснование метода**

Линейчатые спектры разных химических элементов отличаются друг от друга по числу и расположению линий. Для каждого вещества линейчатый спектр индивидуален и нет двух одинаковых линейчатых спектров для разных веществ. Это свойство используется в спектральном анализе.

*Спектральным анализом* называется физический метод определения химического состава веществ по их спектрам.

Различают качественный и количественный анализ. Задачей *качественного спектрального анализа* является установление всех химических элементов, из которых состоит исследуемый образец. Она решается путем измерения длин волн спектральных линий излучения вещества и отождествления их по таблицам с определенными химическими элементами. В задачу *количественного спектрального анализа* входит определение концентраций химических элементов, содержащихся в веществе – источнике излучения. Этот анализ производится путем измерения интенсивностей спектральных линий данного элемента и последующего сравнения их с интенсивностями тех же линий в образцах с известной концентрацией того же элемента.

Спектральный анализ в подавляющем большинстве случаев точнее, быстрее и чувствительнее химических методов и поэтому широко применяется в современном производстве и в научных исследованиях. Особую роль играет спектральный анализ в астрофизике: здесь это единственный экспериментальный метод определения химического

состава в строении звезд. В сельском хозяйстве, например, определяют количество микроэлементов в почве, растениях и кормах.

Различают атомный и молекулярный спектральный анализ. В обоих случаях анализ может проводиться по спектрам излучения и тогда он называется *эмиссионным*. Анализ по спектрам поглощения именуется *абсорбционным*.

Спектры излучения атомов обычно получают при высокой температуре источника света, при которой происходит испарение вещества, расщепление его молекул на отдельные атомы и возбуждение атомов.

Очень часто оказывается важным, чтобы в процессе анализа молекулы не изменяли своей структуры. В этом случае спектры лучше изучать в поглощении. При абсорбционном анализе свет от источника со сплошным спектром пропускают через исследуемое вещество. При этом часть световой энергии будет избирательно поглощаться атомами или молекулами вещества. В результате на фоне сплошного спектра появятся темные линии и полосы поглощения. По положению, структуре и коэффициенту поглощения этих линий можно узнать состав и строение исследуемого вещества.

### Описание установки

Для спектрального анализа используют специальные приборы – спектроскопы, спектрографы. *Спектроскопы* позволяют наблюдать исследуемый спектр, *спектрографы* – записывать его. Одним из видов спектроскопов и спектрографов являются монохроматоры – спектральные приборы, предназначенные для выделения монохроматического излучения. По способу получения спектра спектральные приборы делятся на дифракционные и дисперсионные (призмные). Работа дифракционных приборов основана на явлении дифракции света, работа призмных – на явлении дисперсии.

*Дисперсией света* называется зависимость показателя преломления вещества от длины волны падающего излучения (рис. 2). С учетом этого из закона преломления следует, что составляющие белый свет волны различных длин, будут отклоняться призмой на разные углы, что приведет к появлению спектра.

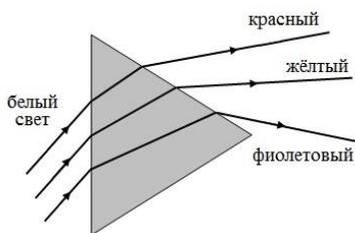


Рис. 2. Дисперсия света

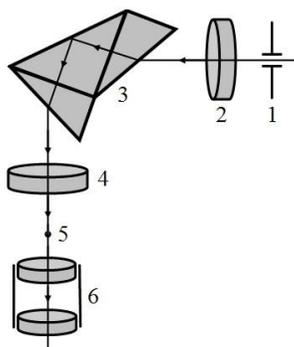


Рис. 3. Оптическая схема монохроматора УМ-2

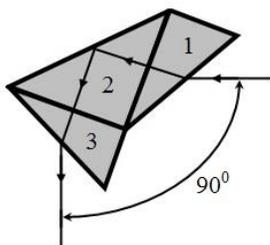


Рис. 4. Ход лучей света через призму Аббе

В этой работе применяется призмный универсальный монохроматор УМ-2, оптическая схема которого представлена на рисунке 3.

Свет от источника проходит через входную щель 1, установленную в фокусе объектива коллиматора 2, создающего параллельный пучок и, далее, на диспергирующий элемент — призму Аббе 3, склеенную из трех призм, одна из которых изменяет направление входящего луча на  $90^\circ$  (рис. 4).

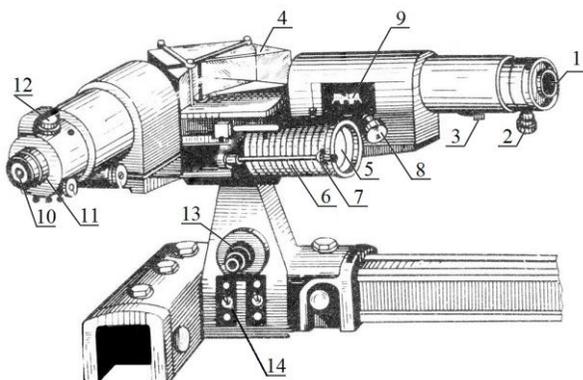
На входной грани призмы в силу дисперсии лучи различных длин волн преломляются по-разному, и только параллельный пучок света одной длины волны выйдет из призмы вдоль оптической оси приемной части прибора. Поворотом призмы можно вывести на оптическую ось прибора последовательно лучи всех длин волн.

Ахроматический выходной объектив 4 проецирует изучаемый спектр в окуляр зрительной трубы 6.

Для выделения луча, идущего вдоль оптической оси прибора, в фокальной плоскости объектива камеры устанавливается игла 5, силуэт которой виден через окуляр вместе с изображениями спектральных линий (рис. 5).



*Рис. 5. Вид поля зрения окуляра с набором спектральных линий и иглой-указателем*



*Рис. 6. Внешний вид монохроматора*

столике (на рисунке не показан), который поворачивается с помощью рычага вращением барабана 5. На барабане нанесены деления для градуировки монохроматора по спектру (шкала 6). Барабан снабжен указателем 7. Объектив коллиматора перемещают поворотом винта 8 со шкалой 9. Изучаемый спектр наблюдается в окуляр 10 в оправе 11 зрительной трубы. Освещение иглы-указателя осуществляется лампой накаливания через сменные светофильтры в револьверной оправе 12 (расположены над окуляром). Для регулировки освещения указателя на основании прибора установлен реостат 13 с выключателем 14.

Общий вид монохроматора и его органы управления показаны на рисунке 6.

Свет от источника попадает на входную щель коллиматора 1, ширину которой можно изменять барабаном 2. Для перекрытия светового потока, идущего в монохроматор, между входной щелью и объективом коллиматора установлена шторка, закрываемая поворотом ручки 3 на корпусе прибора (на ручке надписи «Откр» – «Закр»). Внутри

монохроматора находится диспергирующая призма 4, установленная на

## Порядок выполнения работы

1. Подготовьте таблицу для записи результатов:

Таблица 1

Элемент	Цвет линии	Длина волны $\lambda$ , нм	Отсчет барабана
Ртуть (Hg)	фиолетовый	404,7	
	фиолетовый	407,8	
	синий	434,7	
	синий	435,8	
	голубой	491,6	
	зеленый	546,1	
	желтый	577,0	
	желтый	579,0	
	оранжевый	612,0	
	оранжевый	617,6	
	красный	623,2	
	красный	690,7	
	Исследуемый		

2. На рельсе вблизи входной щели УМ-2 установите кожух с ртутной лампой. Включите блок питания лампы в сеть 220 В, тумблер блока переведите в положение «Вкл». Для достижения максимальной яркости ртутной лампы потребуется некоторое время (3-5 мин).

**ВНИМАНИЕ!** Ртутная лампа наряду с видимым светом излучает ультрафиолет, вредный для глаз. Во избежание ожогов сетчатки глаза, лампа помещена в непрозрачный футляр с окошком, направленным в сторону щели монохроматора. Ртутная лампа - мощный источник света. Во время работы в лампе развивается большое давление, поэтому обращаться с ней следует осторожно.

3. Поставьте шторку 3 в положение «Откр». Установите винтом 8 на шкале 9 фокусировки объектива деление «10». С помощью микрометрического винта 2 установите ширину входной щели 0,01 – 0,02 мм.

4. Включите блок питания иглы-указателя в сеть (находится за монохроматором), тумблер блока питания переведите в положение «Вкл».

5. Включите подсветку иглы-указателя выключателем 14, установите желаемый светофильтр поворотом оправы 12 и отрегулируйте яркость подсветки реостатом 13.

6. Наблюдая через окуляр за спектром, выведите с помощью барабана 5 в поле зрения наиболее яркую желтую двойную линию (дублет) и, поворачивая оправу окуляра, получите четкое изображение спектральной линии и иглы-указателя. При правильной настройке прибора все линии спектра должны быть ровно и ярко освещены. Если желтый дублет не наблюдается, необходимо изменить ширину входной щели с помощью микрометрического винта 2.

7. Наведите иглу-указатель на первую справа фиолетовую линию с помощью барабана 5, установите указатель 7 в начало шкалы барабана.

8. Отградуировать монохроматор. Для этого, вращая барабан 5 во всем интервале его хода, отметьте и занесите в таблицу 1 положение указателя 7 по шкале б для всех интенсивных спектральных линий с указанной длиной волны (рис. 7). При градуировке каждую спектральную линию выставляйте напротив иглы-указателя. Подводить каждую линию к указателю следует только с одной стороны, чтобы избежать погрешности за счет люфта барабана.

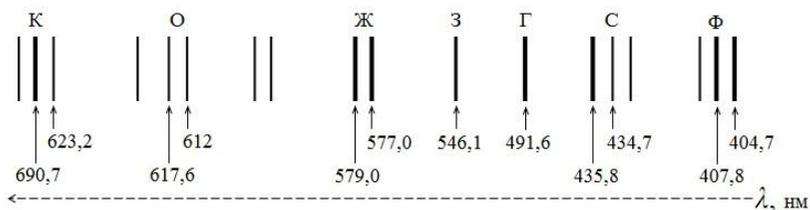


Рис. 7. Спектр ртути

9. Выключите ртутную лампу.

10. Установите напротив входной щели монохроматора лампу с исследуемым источником и включите ее в сеть.

11. Вращением барабана 5 переведите его указатель примерно на середину шкалы.

12. Вращением винта 2, установите ширину щели, при которой наблюдается четкий спектр.

13. Барабаном 5 установите иглу-указатель чуть правее наблюдаемого спектра.

14. Вращением барабана 5 выведите последовательно, начиная с крайней правой, указанные стрелками на рисунке 8 линии на указатель и запишите отчет барабана в таблицу 1.

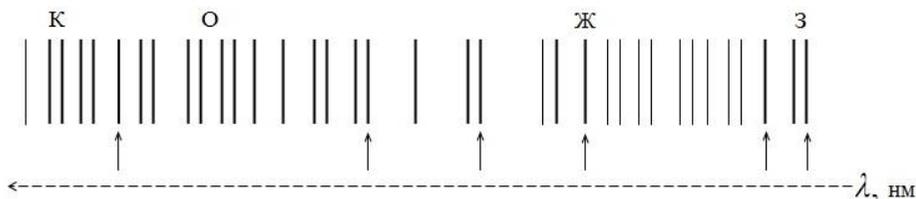


Рис. 8. Изучаемый спектр

15. Выключите все электрические приборы.

### Обработка результатов измерений

1. Постройте градуировочную кривую (зависимость отсчета барабана от длины волны)  $N_{бар} = f(\lambda)$ .

2. По градуировочной кривой определите длины волн линий исследуемого источника и занесите результаты в таблицу 1.

3. Сравните полученные значения с приведенными в таблице 2 и определите, какому элементу они соответствуют.

4. Сделайте вывод, в котором напишите, почему спектр именно этого элемента Вы наблюдали.

Таблица 2

Элемент	Длина волны $\lambda$ , нм
Неон Ne	640
	638
	614
	594,5
	585,2
	540
	533
	503
Натрий Na	616
	615,4
	539,0
	539,6

продолжение таблицы 2

Элемент	Длина волны $\lambda$ , нм
Гелий He	706,5
	658
	586
	502
	492
	471
	447
	403
	389

### Контрольные вопросы

1. Что называется спектром испускания?
2. Какого вида бывают спектры?
3. Объясните происхождение спектров.
4. Объясните устройство и принцип работы монохроматора.
5. В чем заключается градуировка монохроматора, и для каких целей используется градуировочный график?
6. Начертите энергетическую диаграмму атома водорода и покажите стрелками переходы, соответствующие сериям Лаймана, Бальмера, Пашена.

### Лабораторная работа № 7

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВАКУУМНОГО ФОТОЭЛЕМЕНТА**

**Цель работы:** ознакомиться с устройством и принципом действия вакуумного фотоэлемента; изучить вольт-амперную и световую характеристики вакуумного фотоэлемента; определить чувствительность фотоэлемента.

**Оборудование:** лабораторный стенд «Исследование фотоэлемента».

#### **Основные теоретические сведения**

Явление фотоэффекта (*фотоэффект*) возникает при взаимодействии вещества с падающим на него электромагнитным излучением. Различают внешний и внутренний фотоэффект.

*Внешним фотоэффектом* называется явление вырывания электронов из вещества под действием падающего на него света.

*Внутренним фотоэффектом* называется явление увеличения концентрации носителей заряда в веществе и увеличения электропроводности вещества под действием света. Частным случаем внутреннего фотоэффекта является *вентильный фотоэффект* – явление возникновения под действием света электродвижущей силы в контакте двух различных полупроводников или полупроводника и металла.

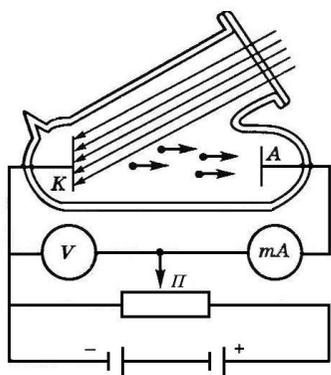


Рис. 1. Схема установки для наблюдения внешнего фотоэффекта

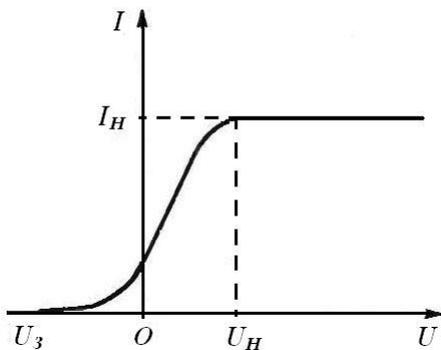


Рис.2. Вольт- амперная характеристика при внешнем фотоэффекте

фиксирует наличие тока в цепи, названного *фототоком*. По полученным значениям силы тока и напряжения между электродами строился график зависимости силы фототока от напряжения  $I = f(U)$ ,

Внешний фотоэффект был открыт в 1887 г. Г. Герцем, а исследован детально в 1888-1890 гг. А. Г. Столетовым. Объяснить закономерности внешнего фотоэффекта удалось в 1905 году А. Эйнштейну.

Столетов проводил свои опыты на установке, схема которой показана на рисунке 1. В стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, помещались два электрода – катод (K) и анод (A). К катоду подводился отрицательный потенциал, к аноду – положительный. Внутри баллона через кварцевое стекло, пропускающее ультрафиолетовое излучение, свет попадал на катод (K). Подаваемое на электроды напряжение изменялось потенциометром (Π) и измерялось вольтметром (V). Под действием света катод испускал электроны, которые замыкали цепь между электродами, и миллиамперметр (mA)

называемый *вольт-амперной характеристикой*. Схематичный график вольт-амперной характеристики при внешнем фотоэффекте показан на рисунке 2.

При отсутствии напряжения между электродами фототок отличен от нуля. Это можно объяснить наличием у некоторых фотоэлектронов при вылете кинетической энергии без ускорения их электрическим полем. При увеличении напряжения между катодом и анодом фототок так же увеличивается. Это связано с тем, что при увеличении напряжения увеличивается скорость выбитых из катода фотоэлектронов и за единицу времени всё большее их количество достигает анода. При некотором значении напряжения между электродами (*напряжении насыщения* ( $U_H$ )) сила фототока перестает зависеть от напряжения и достигает значения *тока насыщения* ( $I_H$ ). Сила фототока насыщения определяется выражением:

$$I_H = \frac{q_{max}}{t}, \quad (1)$$

где  $q_{max} = N \cdot e \cdot t$  – максимальный заряд, переносимый фотоэлектронами;

$N$  – число фотоэлектронов, вылетающих с поверхности освещаемого металла за единицу времени;

$e$  – заряд электрона;

$t$  – время.

При фототоке насыщения все электроны, покинувшие за 1 секунду поверхность металла, за это же время попадают на анод. Поэтому по силе фототока насыщения можно судить о числе фотоэлектронов, вылетающих с катода в единицу времени.

Если катод соединить с положительным полюсом источника напряжения, а анод – с отрицательным, то в электростатическом поле между электродами фотоэлектроны будут тормозиться, а сила фототока уменьшаться при увеличении значения этого отрицательного напряжения. При некотором значении отрицательного напряжения ( $U_3$ ), названном *задерживающим напряжением*, фототок прекращается. При этом работа задерживающего электрического поля равна максимальному значению кинетической энергии фотоэлектронов:

$$eU_3 = \frac{m \cdot v_{max}^2}{2}. \quad (2)$$

Следовательно, зная задерживающее напряжение, можно найти максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов.

На основании выявленных экспериментальных закономерностей Столетовым были сформулированы законы внешнего фотоэффекта, получившие название *законов Столетова*:

1. Фототок насыщения прямо пропорционален падающему световому потоку.
2. Максимальная скорость фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности.
3. Для каждой поверхности существует минимальная частота  $\nu_0$  (максимальная длина волны  $\lambda_0$ ) называемая *красной границей фотоэффекта*, при которой еще возможен внешний фотоэффект:

$$\nu_0 = \frac{A}{h}, \quad (3)$$

$$\lambda_0 = \frac{c \cdot h}{A}, \quad (4)$$

где  $A$  – работа выхода электрона;

$c$  – скорость света;

$h=6,625 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка.

При частоте  $\nu < \nu_0$  и длине волны  $\lambda > \lambda_0$  фотоэффект отсутствует.

Понятие красная граница фотоэффекта получила своё название от того, что из видимой части оптического спектра именно красный цвет обладает наибольшей длиной волны и наименьшей частотой, хотя для разных материалов эта величина может принимать различные значения длин волн и частот, не относящихся к красному цвету.

Для того чтобы электрон мог покинуть вещество и выйти в окружающее пространство, ему необходимо сообщить энергию, равную энергии связи электрона с кристаллической решеткой. Эту энергию называют *работой выхода* ( $A$ ). Величина работы выхода зависит от химической природы вещества, состояния его поверхности и других факторов. Единица измерения работы выхода в СИ 1 Дж (*джоуль*). Часто работу выхода выражают в *электрон – вольтах* (эВ),  $1\text{эВ}=1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.

Второй и третий законы фотоэффекта нельзя объяснить на основе волновой теории света, поэтому А. Эйнштейн показал, что явление фотоэффекта и его закономерности могут быть объяснены на основе предложенной им *квантовой теории фотоэффекта*. Согласно Эйнштейну, свет испускается, распространяется в пространстве и поглощается веществом не непрерывно, как считалось раньше, а отдельны-

ми порциями (квантами) и эти процессы нужно рассматривать как поток локализованных в пространстве дискретных световых частиц, движущихся со скоростью распространения света.

При взаимодействии с электроном вещества световая частица – фотон отдает ему свою энергию, называемую квантом:

$$E = h \cdot \nu, \quad (5)$$

По Эйнштейну, каждый квант поглощается только одним электроном, поэтому число вырванных фотоэлектронов должно быть пропорционально световому потоку. (1-й закон фотоэффекта).

Если энергия фотона больше или равна работе выхода:

$$h\nu \geq A, \quad (6)$$

то возможен выход электронов за пределы вещества. Этот процесс описывается *законом Эйнштейна*: при фотоэффекте энергия падающего на вещество фотона расходуется на вырывание электрона из вещества и на сообщение ему кинетической энергии. Математическая запись данного закона носит название *уравнения Эйнштейна для фотоэффекта*

$$h\nu = A + \frac{m \cdot v_{\max}^2}{2}, \quad (7)$$

где  $\frac{m \cdot v_{\max}^2}{2}$  – максимальная кинетическая энергия освобожденного

электрона;

$m$  – масса фотоэлектрона;

$v_{\max}$  – максимальная скорость вылета фотоэлектрона.

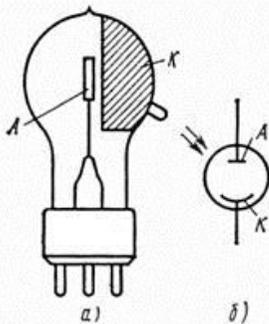


Рис.3. Устройство (а) и условное изображение (б) вакуумного фотоэлемента

На явлении внешнего фотоэффекта основано действие фотоэлектрических приборов – *фотоэлементов* (сокращенно ФЭ) и *фотоумножителей*. Фотоэлементом называется прибор, в котором воздействие энергии оптического диапазона вызывает изменение его электрических свойств. Различают вакуумные и газонаполненные фотоэлементы.

Вакуумным фотоэлементом (рис.3 а, б) называют фотоэлектронный прибор, два электрода которого –

катод и анод помещены в стеклянную колбу, в которой создается вакуум порядка  $10^{-4} - 10^{-5}$  Па (по сравнению с нормальным атмосферным давлением  $10^5$  Па). Вакуум создаётся для того, чтобы молекулы воздуха не препятствовали потоку электронов, летящих к аноду. Фотокатодом ( $K$ ) фотоэлемента (рис.3 а) является тонкий слой светочувствительного материала, нанесенного на внутреннюю поверхность колбы.

Обычно в фотоэлементах применяют серебряно-кислородно-цезиевые, сурьмяно-цезиевые и многощелочные фотокатоды. В фотоэлементах, предназначенных для работы в ультрафиолетовом спектре излучения, иногда используют сурьмяно-калиевые фотокатоды. Анод ( $A$ ) фотоэлемента выполняют из никеля в виде проволочного кольца, петли или тонкой металлической сетки, что позволяет свободно пропускать свет на фотокатод. Выводы фотокатода и анода оформляют в одном или двух разнесенных цоколях.

Одним из основных параметров фотоэлемента является его чувствительность:

$$k = \frac{I_H}{\Phi}, \quad (8)$$

где  $I_H$  – сила фототока насыщения;

$\Phi$  – световой поток, вызвавший этот ток насыщения.

Единица измерения чувствительности фотоэлемента в СИ 1 А/лм (ампер на люмен). Однако, из за малых значений фототоков эту величину обычно измеряют в микроамперах на люмен (мкА/лм).

Различают интегральную и спектральную чувствительности фотоэлемента. *Интегральная чувствительность* характеризует способность фотоэлемента реагировать на воздействие светового потока сложного излучения. *Спектральная чувствительность* определяет силу фототока при воздействии монохроматического светового потока. Интегральная чувствительность вакуумных фотоэлементов обычно не превышает 150 мкА/лм.

Для увеличения чувствительности фотоэлементов внутрь колбы вводят небольшое количество газа, чаще всего аргона. Такие фотоэлементы называются газонаполненными. Ионизация молекул газа электронами, летящими с катода, приводит к увеличению тока, текущего в цепи фотоэлемента.

Фотоэлементы нашли широкое применение в технике, например, применяются для считывания звука, записанного на киноплёнке в виде специальной дорожки, обладающей различной проницаемостью для света. Так же фотоэлементы широко используются в фотореле –

приборах включающих или выключающих электрическую цепь под воздействием изменяющегося светового потока. Фотореле широко используются в системах автоматизации (автоматическое открытие дверей, включение ночного освещения и др.) и охраны.

### Обоснование метода

Если к фотоэлементу, на фотокатод которого падает световой поток, приложено положительное анодное напряжение, то в цепи появится фототок. Вид зависимости тока от напряжения между анодом и катодом представлен на рисунке 2. Построив вольт-амперную характеристику фотоэлемента можно определить для него напряжение и ток насыщения. Если построить вольт-амперные характеристики для разных световых потоков, то по полученным значениям токов насыщения возможно построить *световую характеристику фотоэлемента* (зависимость токов насыщения от светового потока:  $I_H = f(\Phi)$ ) и тем самым проверить первый закон Столетова. Если первый закон Столетова выполняется, то световая характеристика имеет вид восходящей прямой. Технически световой поток можно изменять несколькими способами. Самый простой способ изменения светового потока – планомерное помещения фотоэлемента на различное расстояние от источника света.

Зная численные значения токов насыщения при различных известных значениях светового потока можно, используя выражение (8) определить чувствительность фотоэлемента.

### Описание установки

В данной работе для исследования фотоэлемента в виде стенда собрана специальная установка, электрическая схема которой приведена на рисунке 5. В установку входят: блок питания 1, потенциометр 2, фотоэлемент 3, источник света 4 с отдельным блоком питания 5. Для контроля напряжения используется вольтметр 6. Сила фототока регистрируется в цепи микроамперметром 7. Конструкция установки выполнена следующим образом. С одной стороны (рис. 6) специальной светонепроницаемой трубы 1 закреплена коробка 2 с размещённым в ней фотоэлементом СЦВ-3 (сурьяно-цезивый вакуумный). С другой стороны трубы на подвижной трубке с линейкой 3, закреплена лампа (на рисунке не показана).

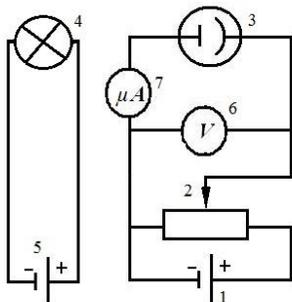


Рис. 5. Электрическая схема лабораторной установки

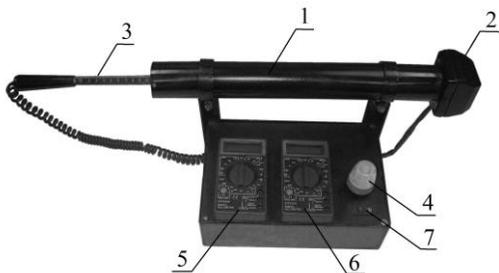


Рис. 6. Внешний вид лабораторной установки

Расстояние от лампы до фотоэлемента можно изменять, вдвигая или выдвигая подвижную трубку с линейкой 3. При помощи потенциометра, ручка 4 которого находится на лицевой панели установки, можно изменять напряжение между электродами фотоэлемента. Напряжение на фотоэлементе и сила фототока фиксируются цифровыми вольтметром 5 и микроамперметром 6.

### Порядок выполнения работы

1. Подготовьте таблицы для записи результатов измерений:

Таблица 1

№ п/п	U, В	I, мкА		
		$r_1 = 0,10$ м	$r_2 = 0,15$ м	$r_3 = 0,20$ м
1	0			
2	2			
3	4			
4	6			
5	8			
6	10			
7	15			
8	20			
9	25			
10	30			

Таблица 2

$r$ , м	$I_H$ , мкА	$\Phi$ , лм	$k$ , мкА/лм	$\Delta k$ , мкА/лм	$E_k$ , %
0,10					
0,15					
0,20					
		среднее			

2. Убедитесь, что ручка потенциометра 4 (рис. 6) находится в крайнем левом положении, а выключатель питания 7 установки находится в положении 0 (выключено).

3. Установите источник света на расстояние 0,10 м от фотоэлемента по линейке 3 стенда.

4. Подключите стенд лабораторной установки к сети 220 В.

5. Установите переключатель пределов вольтметра 5 в положение «200» (DCV) (измерение напряжения в цепи постоянного тока до 200 вольт).

6. Установите переключатель пределов микроамперметра 6 в положение «200  $\mu$ » (DCA) (измерение силы тока в цепи постоянного тока до 200 микроампер).

7. Переключите выключатель питания 7 установки в положение I (включено).

8. Произведите измерение силы фототока в цепи соответствующей напряжению 0 вольт. Занесите результат измерения в таблицу 1.

9. Вращая ручку потенциометра 4 по часовой стрелке и устанавливая необходимые значения напряжения, произведите измерения величины фототока для всех значений напряжения указанных в таблице 1. Запишите результаты измерений в таблицу 1.

**Внимание!** При снятии показаний с цифровых приборов значения колеблются на уровне десятых долей, ввиду высокой чувствительности приборов. Поэтому при снятии показаний следует записывать средние значения напряжения и фототока.

10. Повторите измерения по пунктам 8-9 для расстояний 0,15 м и 0,20 м. Результаты измерений занесите в таблицу 1.

## Обработка результатов измерений

1. По данным таблицы 1 постройте вольт-амперные характеристики фотоэлемента в одной системе координат  $I = f(U)$  для расстояний  $r = 0,10; 0,15; 0,20$  м.

2. Рассчитайте значения светового потока  $\Phi$  для расстояний  $r = 0,10; 0,15; 0,20$  м по формуле:

$$\Phi = \frac{i \cdot S}{r^2} \quad (\text{лм}) \text{ (люмен)},$$

где  $i$  – сила света источника;

$S$  - площадь катода.

При расчётах примите  $i = 0,9$  кд (*кандел*) и  $S = 1,8 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>. Запишите результаты вычислений в таблицу 2.

3. По построенным графикам определите величины токов насыщения  $I_n$  при различных расстояниях, соответствующих различным значениям световых потоков. Запишите результаты в таблицу 2.

4. По формуле (8) определите чувствительность фотоэлемента для световых потоков, соответствующих расстояниям 0,10; 0,15; 0,20 м. Запишите результаты в таблицу 2.

5. Определите среднее значение чувствительности фотоэлемента. Запишите результат в таблицу 2.

6. Определите методом среднего значения абсолютную и относительную погрешности измерения чувствительности. Запишите результаты в таблицу 2.

7. Конечный результат представьте в виде:

$$k = (k_{cp} \pm \Delta k_{cp}) \text{ мкА/лм}; E_k = \dots\%$$

8. По совокупности значений световых потоков и соответствующих им токов насыщения  $I_n$  (таблица 2) постройте график зависимости  $I_n = f(\Phi)$  и проверьте справедливость первого закона Столетова.

9. Сделайте вывод, в котором отразите какими причинами могут быть вызваны отличия полученных значений интегральной чувствительности фотоэлемента от табличных (см. прил. 7), как полученный график световой характеристики соответствует первому закону Столетова и чем могут быть вызваны отклонения от него.

## Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление внешнего фотоэффекта?
2. Объясните, используя уравнение Эйнштейна, второй и третий законы фотоэффекта.
3. Опишите устройство вакуумного фотоэлемента, принцип его действия и область применения.
4. Почему фотокатоды, облучаемые видимым светом, не могут быть изготовлены из таких металлов как вольфрам, никель?
5. Что называется красной границей фотоэффекта и от чего зависит её значение?
6. В чем причина «старения» фотоэлементов?
7. Каковы характерные особенности вольт-амперной характеристики вакуумного фотоэлемента?
8. Каковы причины возникновения тока насыщения?
9. Как зависит сила тока насыщения от величины падающего на фотоэлемент светового потока?

## Лабораторная работа № 8

### ***ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРИНЫ УЗКОЙ ЩЕЛИ***

*Цель работы:* ознакомиться с принципом действия твердотельного и газового лазеров, определить ширину щели при помощи луча лазера дифракционным методом.

*Оборудование:* гелий-неоновый лазер, раздвижная щель, линейка, экран.

## Основные теоретические сведения

*Излучением* называется процесс испускания и распространения энергии веществом в виде волн и частиц.

В основе излучения лежит квантовая теория атома, предложенная в 1913 г. датским физиком Нильсом Бором и базирующаяся на двух постулатах.

*Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний):* в атоме существуют *стационарные (не изменяющиеся во времени) состояния*, в которых он не излучает энергии. Стационарным состояниям

атома соответствуют стационарные орбиты, по которым движутся электроны.

*Второй постулат Бора (правило частот):* при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую происходит излучение (или поглощение) одного фотона с энергией, равной разности энергий соответствующих стационарных состояний, т.е.:

$$h\nu = E_n - E_m, \quad (1)$$

где  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;

$\nu$  – частота излучения;

$E_n$  – энергия стационарного состояния до излучения;

$E_m$  – энергия стационарного состояния после излучения.

При  $E_n > E_m$  происходит излучение фотона (переход атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией, т.е. переход электрона с более удаленной от ядра орбиты на более близлежащую), при  $E_n < E_m$  – его поглощение.

Рассмотрим сущность излучения. Пусть электрон в атоме может находиться в состояниях 1 и 2, характеризуемых энергиями  $E_1$  и  $E_2$  соответственно (рис. 1). Чтобы перевести электрон с уровня 1 на более высокий энергетический уровень 2 (рис. 1а), ему необходимо сообщить энергию, согласно формуле (1).

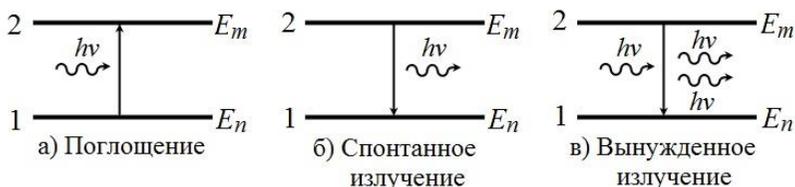


Рис. 1. Поглощение и излучение света веществом

Однако через некоторый промежуток времени без каких-либо внешних воздействий произойдет обратный переход с испусканием фотона (рис. 1б). Такой процесс называется *спонтанным излучением*. Поскольку различные атомы излучают независимо друг от друга, спонтанные излучения являются некогерентными.

Вернуться в невозбужденное состояние атомы могут и другим путем. Если на атом, находящийся в возбужденном состоянии 2 действует внешнее излучение с частотой, удовлетворяющей условию (1),

то возникает вынужденный (индуцированный) переход в состояние 1 с излучением дополнительного фотона той же энергии (рис. 1 в). Возникающее в результате таких переходов излучение называется *вынужденным (индуцированным)*. Главной особенностью такого излучения является то, что излучаемый «новорожденный» фотон абсолютно не отличим от первичного фотона. Он имеет ту же частоту и фазу, те же поляризацию и направление движения, т.е. вынужденное излучение является монохроматическим, когерентным, поляризованным.

Обычно под действием вынужденного излучения происходят одновременно как переходы электронов в возбужденное состояние, так и индуцированные переходы на нижний энергетический уровень. Вероятность вынужденных переходов «вниз» и «вверх», т.е. вероятность вынужденного испускания и поглощения, в веществе одинакова и пропорциональна числу атомов на соответствующих энергетических уровнях.

Число атомов, обладающих определенным значением энергии (находящихся на определенном энергетическом уровне), называется *населенностью данного уровня энергии*.

В системах, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, населенность уровня с большей энергией всегда меньше, чем населенность уровня с меньшей энергией. Поскольку вероятность вынужденных переходов «вверх» и «вниз» в веществе одинакова и пропорциональна числу атомов на соответствующих энергетических уровнях, то вынужденных переходов «вверх» всегда будет больше, чем переходов «вниз», и вещество всегда будет больше поглощать, чем излучать. Для того, чтобы среда обладала свойством усиливать падающее на нее излучение, необходимо создать неравновесное состояние системы, при котором населенность верхнего энергетического уровня больше населенности основного. Такое состояние вещества называется *инверсионным состоянием* или состоянием с отрицательной термодинамической температурой.

У определенных веществ имеются энергетические уровни, спонтанный переход с которых на основной с излучением фотонов имеет вероятность в десятки тысяч раз меньше, чем с обычного возбужденного уровня энергии. Энергетические уровни атома с большим временем жизни чем на нестабильных, называются *метастабильными*. Создавая инверсию населенности на метастабильном уровне, можно накопить большое число атомов в инверсном состоянии (накачать).

Такую среду можно использовать для значительного усиления, падающего на нее излучения.

Практическое применение теории вынужденного излучения осуществлено в оптических квантовых генераторах (ОКГ) или лазерах. Термин «*лазер*» образован из начальных букв английской фразы: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – усиление света с помощью вынужденного излучения.

Важнейшими из существующих типов лазеров являются твердотельные, газовые, полупроводниковые и жидкостные (в основу такого деления положен тип активной среды).

Лазер обязательно имеет три основных компонента:

- 1) *активную среду*, в которой создаются состояния с инверсной населенностью;
- 2) *систему накачки* (устройство для создания инверсии в активной среде);
- 3) *оптический резонатор* (устройство, выделяющее в пространство избирательное направление пучка фотонов и формирующее выходящий световой пучок).

Рассмотрим принцип действия твердотельного лазера (рис. 2), активной средой которого является стержень 1 из синтетического рубина (окись алюминия с очень малой примесью хрома).

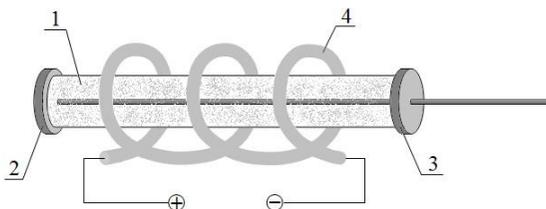


Рис. 2. Устройство рубинового лазера

Плоскопараллельные торцы стержня 2 и 3, выполняющие роль оптического резонатора, тщательно отполированы и посеребрены настолько, что первый полностью зеркален, а второй пропускает около 10% излучения. Рубиновый стержень окружен спиральной импульсной лампой 4, ярко вспыхивающей сине-зеленым светом (лампа накачки). Свет лампы переводит атомы хрома с энергетического уровня 1 на уровень 3 (рис. 3), с которого через некоторое время эти атомы спонтанно и безызлучательно переходят на метастабильный уровень 2 (небольшое число атомов переходят сразу на уровень 1). На уровне 2

создается значительная перенаселенность по сравнению с уровнем 1, т.е. возникает инверсная населенность уровней 2 – 1. Теперь любой фотон, возникший в рубине в результате спонтанного излучения на переходе 2 – 1, вызовет вынужденное излучение такого же фотона. Они, в свою очередь, породят еще два, эти четыре породят еще восемь и т.д.

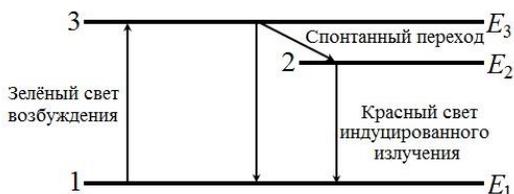


Рис. 3. Принцип действия рубинового лазера

Первоначально большинство фотонов будет покидать кристалл через его боковые стенки, пока в результате спонтанного излучения не возникнет фотон, летящий строго вдоль оси кристалла. Именно он вызовет появление таких же фотонов вынужденного излучения, которые испытывая многократные отражения от зеркал на торцах стержня, приведут их к лавинообразному нарастанию, т.е. к вспышке высококогерентного монохроматического поляризованного света.

В газовых лазерах инверсная населенность уровней осуществляется электрическим разрядом, возбуждаемым в газах. Рассмотрим устройство и принцип действия газового гелий-неонового лазера.

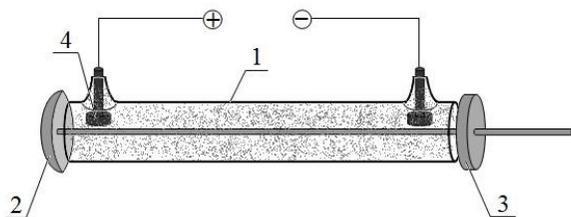


Рис. 4. Устройство газового лазера

Активная среда представляет собой смесь гелия и неона закаченную в газоразрядную трубку 1 (рис. 4). Атомы неона являются излучающими (рабочими), атомы гелия – вспомогательными, необходимыми для создания инверсной населенности атомов неона. Оптическим резонатором являются два зеркала, перпендикулярные оси труб-

ки, одно из которых (2) сферическое, другое (3) – полупрозрачное плоское. Между электродами (4) трубки прикладывается высокое напряжение для возбуждения газового разряда в смеси.

На рисунке 5 изображены энергетические уровни атомов неона и гелия. При электрическом разряде в трубке возбуждаются и переходят в состояние 2 атомы гелия. Первый возбужденный уровень 2 гелия совпадает с энергетическим уровнем 3 атомов неона. Поэтому, соударяясь с атомами неона, атомы гелия передают им свою энергию и переводят их в возбужденное состояние 3 с инверсной населенностью.

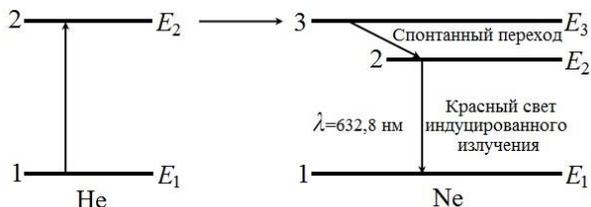


Рис. 5. Энергетические уровни атомов неона и гелия

Спонтанный переход отдельных атомов неона с энергетического уровня 3 на уровень 2 вызывает лавинообразное появление новых фотонов, которые резонатором формируются в пучок лазерного излучения.

Лазеры являются самыми мощными источниками света. Мощность импульса лазерного излучения составляет десятки миллионов ватт, а плотность потока энергии (интенсивность света) в сто тысяч раз превосходит интенсивность излучения Солнца. С помощью оптических линз излучение лазера можно сфокусировать, тем самым еще увеличив его интенсивность. Лазеры широко используются в самых различных областях науки и техники. Это сварка микрообъектов, сверление и резка сверхтвердых материалов, ускорение хода химических реакций, передача световых сигналов на сверхдальние расстояния (космическая связь), глазная хирургия и т.д.

### Описание установки

В данной работе ОКГ используется в качестве источника света для получения дифракционной картины от узкой щели (суть явления дифракции описана в лабораторной работе № 1). Схема установки приведена на рисунке 6. Свет от лазера 1 падает на щель 2. При этом на экране 3 с миллиметровой сеткой наблюдается дифракционная кар-

тина в виде чередующихся минимумов и максимумов интенсивности света.

В центре экрана наблюдается самый яркий центральный максимум. Темные участки, прилегающие к нему, называются минимумами 1-го порядка, затем идут максимумы 1-го порядка и т.д.

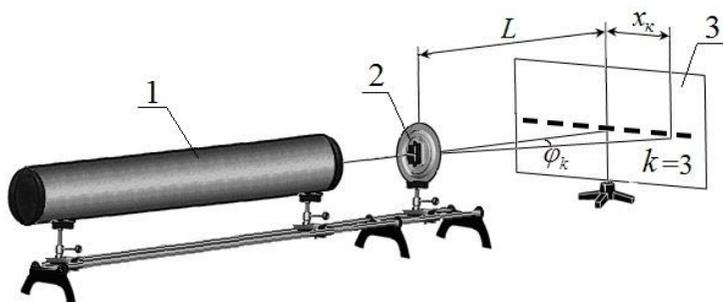


Рис. 6. Схема экспериментальной установки

### Обоснование метода

Положение минимумов и максимумов дифракционной картины  $x_k$  (рис. 6), определяемые относительно центрального максимума зависят от длины волны, ширины щели и расстояния от щели до экрана. Таким образом, по известной длине волны  $\lambda$  и измеренным  $L$  и  $x_k$ , можно определить ширину щели.

Условие минимумов дифракционной картины задается уравнением:

$$b \cdot \sin \varphi_k = k \lambda, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны падающего излучения;

$k = 1, 2, 3, \dots$  – порядок минимума;

$b$  – ширина щели;

$\varphi_k$  – угол между направлением на максимум нулевого порядка и минимум  $k$ -го порядка.

Из (2) следует

$$b = \frac{k \lambda}{\sin \varphi_k}. \quad (3)$$

Обозначим расстояние от середины центрального максимума до середины минимума  $k$ -го порядка через  $x_k$ ,  $L$  – расстояние от щели до экрана. Из рисунка 6 получаем:

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{x_k}{L}. \quad (4)$$

Так как для малых углов  $\operatorname{tg} \varphi_k \approx \sin \varphi_k$ , то с учетом выражения (4):

$$\sin \varphi_k = \frac{x_k}{L}. \quad (5)$$

После подстановки выражения (5) в формулу (3), имеем:

$$b = \frac{k \lambda L}{x_k}. \quad (6)$$

### Порядок выполнения работы

**Внимание!** При работе с лазером необходимо помнить, что попадание лазерного луча в глаз опасно для зрения!

1. Подготовьте таблицу для записи результатов:

Таблица

№	$L, \text{м}$	$\Delta L, \text{м}$	$k$	$x_k, \text{м}$	$\Delta x_k, \text{м}$	$b, \text{м}$	$\Delta b, \text{м}$	$E_b, \%$
1	0,9		3					
2			5					
3			7					
4	0,6		3					
5			5					
6			7					
7	0,3		3					
8			5					
9			7					

2. С помощью лаборанта или преподавателя включите ОКГ. Для этого включите в сеть 220 В сетевой шнур источника питания. Ручку переключателя «ток лазера» переведите в положение IV. Включите переключатель «сеть» и «накал» на источнике питания, при этом должны загореться лампочка «сеть» и появиться генерация.

3. Получите четкую дифракционную картину на экране, установив расстояние между щелью и экраном 0,9 м, при этом плоскость щели должна располагаться перпендикулярно лучу лазера.

4. По миллиметровой сетке измерьте расстояние  $x_k$  (рис. 6) для 3, 5 и 7 минимумов ( $k=3, 5, 7$ ) и занесите результаты в таблицу.

5. Повторите пункт 4, не меняя ширины щели, еще два раза для расстояний, указанных в таблице.

6. Занесите значения  $\Delta x_k$  и  $\Delta L$  в таблицу.

7. Выключите лазер.

### Обработка результатов измерений

1. Для всех опытов по формуле (5) определите ширину щели  $b$ , приняв  $\lambda = (632,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-9}$  м.

2. По формуле  $E_b = \left( \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta x_k}{x_k} \right) \cdot 100\%$  определите относительную погрешность для всех измерений.

3. По формуле  $\Delta b = \frac{E_b}{100\%} \cdot b$  рассчитайте значения абсолютной погрешности для всех измерений.

4. Занесите результаты всех вычислений в таблицу.

5. Запишите лучший результат в виде  $b = (b \pm \Delta b)$  м,  $E_b = \dots\%$ .

6. Сделайте вывод по результатам работы.

### Контрольные вопросы

1. Опишите механизм возникновения спонтанного и вынужденного излучения атомов. Укажите основные свойства вынужденного излучения.

2. Какое состояние называется состоянием с инверсной населенностью?

3. Дайте определение понятия метастабильный уровень энергии атома.

4. Опишите устройство и принцип действия He-Ne - лазера.

5. Опишите устройство и принцип действия рубинового лазера.

6. Каково назначение резонатора в газовом лазере?

## Приложение

### 1. Основные физические постоянные (значения округленные)

Физическая величина	Обозначение	Числовые значения
Ускорение свободного падения	g	9,81 м/с <sup>2</sup>
Гравитационная постоянная	G	6,67 · 10 <sup>-11</sup> м <sup>3</sup> /(кг·с <sup>2</sup> )
Постоянная Ридберга	R <sub>λ</sub>	1,097·10 <sup>7</sup> м <sup>-1</sup>
Постоянная Больцмана	k	1,38 · 10 <sup>-23</sup> Дж/К
Заряд электрона, протона	e	1,6 · 10 <sup>-19</sup> Кл
Масса электрона	m <sub>e</sub>	9,11 · 10 <sup>-31</sup> кг
Масса протона	m <sub>p</sub>	1,67 · 10 <sup>-27</sup> кг
Скорость света в вакууме	c	3 · 10 <sup>8</sup> м/с
Постоянная Стефана-Больцмана	σ	5,67 · 10 <sup>-8</sup> Вт/(м <sup>2</sup> · К <sup>4</sup> )
Постоянная Вина	b	2,9 · 10 <sup>-3</sup> м · К
Постоянная Планка	h	6,62 · 10 <sup>-34</sup> Дж·с
Электрическая постоянная	ε <sub>0</sub>	8,85·10 <sup>-12</sup> Ф/м
Магнитная постоянная	μ <sub>0</sub>	12,56·10 <sup>-7</sup> Гн/м

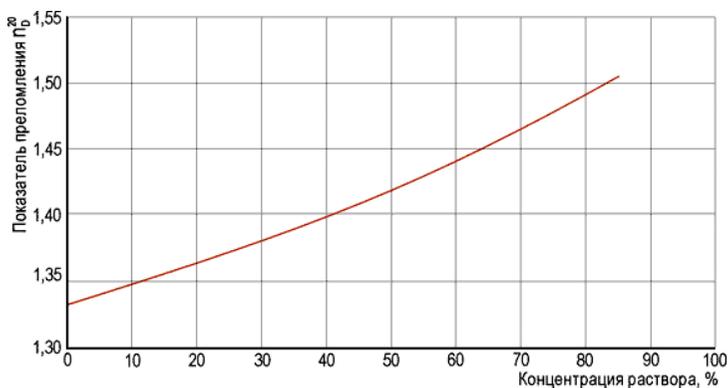
### 2. Приставки для образования кратных и дольных единиц

Приставки кратных единиц	Отношение к основной единице	Обозначение русское	Приставки дольных единиц	Отношение к основной единице	Обозначение русское
экса	10 <sup>18</sup>	Э	деци	10 <sup>-1</sup>	д
пэта	10 <sup>15</sup>	П	санتي	10 <sup>-2</sup>	с
тера	10 <sup>12</sup>	Т	милли	10 <sup>-3</sup>	м
гига	10 <sup>9</sup>	Г	микро	10 <sup>-6</sup>	мк
мега	10 <sup>6</sup>	М	нано	10 <sup>-9</sup>	н
кило	10 <sup>3</sup>	к	пико	10 <sup>-12</sup>	п
гекто	10 <sup>2</sup>	г	фемто	10 <sup>-15</sup>	ф
дека	10 <sup>1</sup>	да	атто	10 <sup>-18</sup>	а

3. Показатели преломления ( $n$ ) водных растворов сахарозы различной концентрации ( $C, \%$ ) при  $20^\circ\text{C}$

$C, \%$	$n$						
0	1,33299	4	1,33879	8	1,34476	12	1,35093
1	1,33442	5	1,34026	9	1,34629	13	1,35250
2	1,33586	6	1,34175	10	1,34782	14	1,35408
3	1,33732	7	1,34325	11	1,34937	15	1,35568

4. График зависимости показателя преломления водных растворов сахарозы от концентрации при  $20^\circ\text{C}$



5. Таблица синусов

	Синусы							Поправки								
	0'	10'	20'	30'	40'	50'	60'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'
0	0,0000	0,0029	0,0058	0,0087	0,0116	0,0145	0,0175	3	6	9	12	15	17	20	23	26
1	0,0175	0,0204	0,0233	0,0262	0,0291	0,0320	0,0349	3	6	9	12	15	17	20	23	26
2	0,0349	0,0378	0,0407	0,0436	0,0465	0,0494	0,0523	3	6	9	12	15	17	20	23	26
3	0,0523	0,0552	0,0581	0,0610	0,0640	0,0669	0,0698	3	6	9	12	15	17	20	23	26
4	0,0698	0,0727	0,0756	0,0785	0,0814	0,0843	0,0872	3	6	9	12	15	17	20	23	26
5	0,0872	0,0901	0,0929	0,0958	0,0987	0,1016	0,1045	3	6	9	12	14	17	20	23	26
6	0,1045	0,1074	0,1103	0,1132	0,1161	0,1190	0,1219	3	6	9	12	14	17	20	23	26
7	0,1219	0,1248	0,1276	0,1305	0,1334	0,1363	0,1392	3	6	9	12	14	17	20	23	26
8	0,1392	0,1421	0,1449	0,1478	0,1507	0,1536	0,1564	3	6	9	12	14	17	20	23	26
9	0,1564	0,1593	0,1622	0,1650	0,1679	0,1708	0,1736	3	6	9	12	14	17	20	23	26
10	0,1736	0,1765	0,1794	0,1822	0,1851	0,1880	0,1908	3	6	9	11	14	17	20	23	26

**Примечание.**

Чтобы отыскать синус некоторого угла, в первом столбце выбирается число в градусах, а в части таблицы расположенной сверху числовое значение в десятках минут. На пересечении строки и столбца находится результат. Для нахождения значений синусов единиц минут к двум последним цифрам результата необходимо прибавить значение соответствующей поправки.

6. Соответствие цветов длинам волн и частотам в видимом диапазоне оптического спектра

Цвет	Длина волны, $10^{-9}$ м	Частота, $10^{12}$ ·Гц
Красный	760-620	395-484
Оранжевый	620-585	484-513
Желтый	585-575	513-522
Желто-Зеленый	575-550	522-545
Зеленый	550-510	545-588
Голубой (Сине-Зеленый)	510-480	588-625
Синий	480-450	625-667
Фиолетовый	450-380	667-789

7. Интегральная чувствительность некоторых вакуумных и газонаполненных фотоэлементов

Марка фотоэлемента	Интегральная чувствительность, мкА/лм
СЦВ-3	80
СЦВ-4	80
Ф-15	145
Ф-16	100

## Библиографический список

1. Курс физики: Учеб. пособие для вузов / Грабовский Р.И. 6-е изд. – СПб.: Изд.-во «Лань», 2002. – 608 с.
2. Зайдель Е.А. Элементарные оценки ошибок измерений. М: Наука, 1967. С. 87-416.
3. Физический энциклопедический словарь / Под ред. А.М. Прохорова. М.: Сов. энцикл., 1983. 928 с.
4. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. Изд. 9-е, перераб. и доп. М.: Изд.-ий центр «Академия», 2004. 560 с.
5. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. 4-е изд., испр.М.: Изд.-ий центр «Академия», 2003. 720 с.