



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Физика»

Практикум
по дисциплине
«Физика»
по разделу

«Оптика и атомная физика»

Лабораторные работы
012, 013, 014.

Авторы
Беликова Т.С., Ершов И.В.,
Илясов В.В., Мардасова И.В.,
Шкиль Т.В.

Ростов-на-Дону, 2022

Аннотация

Практикум содержит краткое описание теории, установок и методики экспериментального определения ряда физических величин для лабораторных работ: «Определение скорости света», «Определение длин волн спектральных линий гелия с помощью дифракционной решётки», «Исследование линейчатых спектров и определение постоянной Ридберга».

Практикум предназначен для студентов инженерных специальностей всех форм обучения, в программу учебного курса которых входит выполнение лабораторных работ по физике (раздел «Оптика и атомная физика»).

Авторы

доцент Беликова Т.С.,
доцент Ершов И.В.,
профессор Илясов В.В.,
доцент Мардасова И.В.,
доцент Шкиль Т.В.



Оглавление

Лабораторная работа О12 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА.....	4
Краткая теория.....	4
Описание экспериментальной установки и методики выполнения работы	5
Порядок выполнения работы.....	7
Контрольные вопросы	11
Лабораторная работа О13 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИН ВОЛН СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ГЕЛИЯ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ	12
Краткая теория.....	12
Порядок выполнения работы.....	15
Контрольные вопросы	18
Лабораторная работа О14 ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙЧАТЫХ СПЕКТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА.....	19
Краткая теория.....	19
Описание экспериментальной установки и методики выполнения работы	22
Порядок выполнения работы.....	23
Контрольные вопросы	25
Литература.....	27

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 012

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА

Цель работы: определить скорость света в воздухе; определить скорость света и абсолютный показатель преломления для акрилового стекла и воды.

Оборудование: прибор для измерения скорости света, цифровой осциллограф, зеркало, кювета с водой, стержень из акрилового стекла, экранированные кабели, оптическая скамья с измерительной линейкой.

Краткая теория

В рамках классической физики свет представляет собой электромагнитные волны, непосредственно воспринимаемые человеческим глазом, длина которых лежит в диапазоне 380–780 нм. До 17 в. было принято считать, что свет распространяется мгновенно. Позднее появились первые предположения о конечности скорости света. Один из первых экспериментов по измерению скорости света с помощью двух наблюдателей с фонарями осуществил Галилей в 1607 г. Способ заключался в измерении времени распространения светового сигнала от одного наблюдателя до другого и обратно. Однако в действительности в этом опыте измерялись времена реакции наблюдателей на световой сигнал, которые значительно превышали фактическое время распространения света. Таким образом, эти измерения оказались безуспешными. Первое успешное измерение скорости света осуществил О. Рёмер в 1676 г. на основе астрономических наблюдений. Рёмер заметил, что интервал времени между затмениями спутника Юпитера Ио меняется в зависимости от приближения или отдаления Земли от Юпитера. Рёмер понял, что эта разница во времени возникает потому, что свет проходит разные расстояния от Юпитера до Земли, что фактически подтверждало конечность скорости света. Оценки скорости света, сделанные Рёмером, составили в среднем 220000 км/с, что на 26% меньше современного значения. Довольно большая погрешность связана с недостаточной точностью измерений радиуса земной орбиты в 17 веке.

В земных условиях скорость света была впервые успешно измерена И. Физо в 1849 г. В опыте Физо использовался вращающийся зубчатый диск, через который пропускался луч света, который отражался от зеркала, и, возвращаясь обратно, снова попадал на прорезь или зуб диска. Скорость света вычислялась через угол поворота и угловую скорость диска и составила по рас-

четам Физо 313000 км/с. Одно из наиболее ранних точно определенных значений скорости света было получено А. Майкельсоном в 1932 г. методом вращающейся призмы и составило 299792 км/с. Во всех перечисленных опытах использовался один и тот же принцип измерения скорости света через отношение пути, пройденного светом, ко времени его распространения.

Скорость света в вакууме является одной из фундаментальных физических констант. Согласно принципу постоянства скорости света Эйнштейна, скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и является одинаковой по всем направлениям во всех инерциальных системах.

При прохождении света через прозрачную среду его скорость уменьшается. *Абсолютный показатель преломления* среды n показывает, во сколько раз скорость света в среде меньше, чем в вакууме:

$$n = \frac{c}{v}.$$

При распространении света в прозрачной среде используется понятие *оптической длины пути*, которая равна произведению геометрической длины пути на показатель преломления среды. Для однородной среды:

$$L = n \cdot s.$$

Описание экспериментальной установки и методики выполнения работы

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Прибор для измерения скорости света со встроенным лазером 1 располагается на оптической скамье 2, на которую помещается стержень из акрилового стекла 3 (или кювета с жидкостью) и зеркало 4.

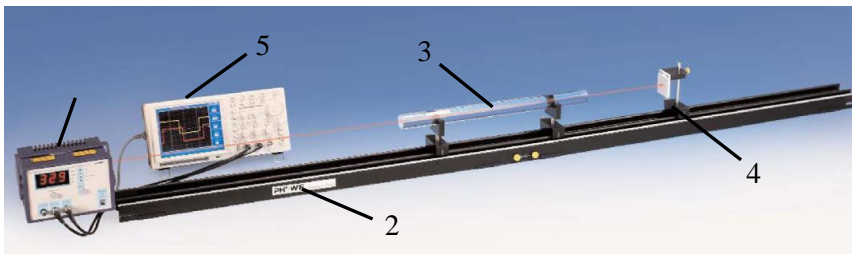


Рис.1 Схема экспериментальной установки

Идея опыта заключается в измерении времени прохождения ла-

зерным лучом определённого расстояния в данной среде. Испущенный лазером сигнал проходит некоторое расстояние, определяемое положением зеркала на оптической скамье, отражается и движется в обратном направлении, пока не попадет на приемник (детектор). Моменты времени испускания и приема испущенного и отраженного лучей фиксируются осциллографом 5. Испускание луча происходит с частотой 50 МГц. Испущенный и принятый сигналы можно синхронизировать по времени, фактически устанавливая «нуль» отсчета времени. В ходе измерений осциллограф будет фиксировать время Δt прохождения световым лучом расстояния Δx , определяемого разностью начального и конечного положений зеркала.

В случае распространения сигнала в воздухе скорость света определяется выражением:

$$c = \frac{2 \cdot \Delta x}{\Delta t}. \quad (1)$$

Для измерения скорости света в среде опыт проводят несколько иначе (рис. 2). На пути распространения света помещают прозрачную среду определенной протяженности, располагая зеркало на границе раздела среды с воздухом (рис. 2а). Испущенный сигнал первую часть пути проходит в воздухе, вторую – в среде, отраженный сигнал проходит тот же путь в обратной последовательности. Далее испущенный и принятый сигналы синхронизируют по времени и затем убирают прозрачную среду с пути распространения света. При этом синхронизация сигналов нарушается, поскольку уменьшается время распространения сигнала (точнее, уменьшается оптическая длина пути). Двигая зеркало вдоль направления распространения сигнала, можно вновь добиться синхронизации, при этом геометрическая длина пути света увеличивается на величину $2\Delta x = 2(x_2 - x_1)$, а оптическая длина пути становится прежней (рис. 2б).

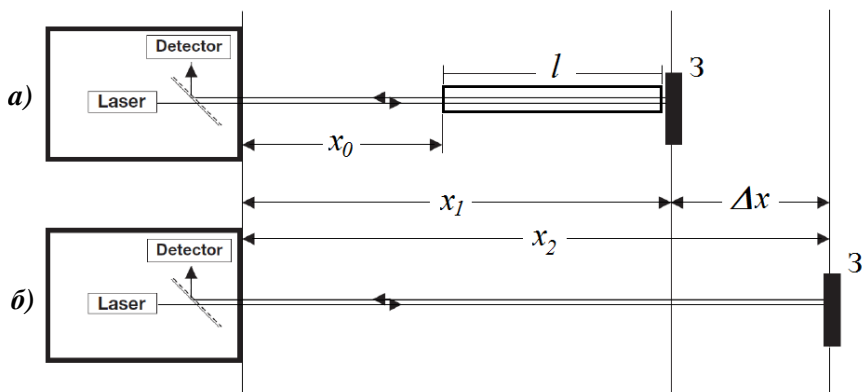


Рис.2. Схема измерения скорости света в

Выразим оптическую длину пройденного светом пути в обоих случаях:

$$L_1 = 2(x_0 + nl),$$

$$L_2 = 2(x_0 + l) + 2\Delta x,$$

где x_0 – расстояние, пройденное светом в воздухе до попадания в прозрачную среду, l – длина акрилового стержня, n – абсолютный показатель преломления среды.

По условию опыта $L_1 = L_2$, поэтому

$$2(x_0 + nl) = 2(x_0 + l) + 2\Delta x,$$

откуда

$$n = \frac{l + \Delta x}{l}. \quad (2)$$

Из определения показателя преломления получим формулу для расчета скорости света в среде:

$$v = \frac{c}{n}. \quad (3)$$

Порядок выполнения работы

Задание 1. Измерение скорости света в воздухе

1. Подсоединить два кабеля к выходам прибора $f_{\text{emit}} - f_{\text{sync}}$ и $f_{\text{ref}} - f_{\text{sync}}$ и ко входам осциллографа **CH1** и **CH2**.

2. Убрать с оптической скамьи все крепления и установить зеркало в положение 0 по мерной линейке.

3. Включить прибор и осциллограф, перевести прибор нажатием Mode в режим **Δφ** и нажать кнопку **Calibration**. На экране осциллографа

вращением ручек **CH1 VOLTS/DIV**, **CH2 VOLTS/DIV** и **SEC/DIV** добиться изображения сигналов прямоугольной формы (красного и желтого цвета), синхронизированных по времени (рис.3). Красный цвет соответствует испущенному сигналу, желтый – отраженному зеркалом.

4. Сместить зеркало на расстояние $\Delta x = 10 \text{ см}$ и измерить сдвиг сигнала по времени на экране осциллографа. Для этого увеличить развертку по времени вращением ручки **SEC/DIV**, затем нажать кнопку **Cursor**, затем **H1**, затем **F3**. С помощью ручек **VERTICAL POSITION** совместить вертикальные пунктирные линии (фиолетовые) со ступеньками красной и желтой линий. В левом углу снизу на экране отображается время запаздывания сигнала, умноженное на 1000 (рис.4). Записать время для данного значения смещения зеркала ($\Delta x = 10 \text{ см}$).

5. Повторить измерения времени запаздывания сигнала для остальных четырёх значений смещения Δx и записать их в таблицу 1.

6. По формуле (1) рассчитать скорость света для каждого значения времени запаздывания и найти среднее значение. Рассчитать абсолютную и относительную погрешности, результаты записать в таблицу 1.

7. Записать окончательный результат в виде: $c = \langle c \rangle \pm \langle \Delta c \rangle$.

Задание 2. *Измерение скорости света и показателя преломления в акриловом стекле и в жидкости*

1. Установить зеркало на отметке $x_1 = 50 \text{ см}$ по линейке оптической скамьи.

2. Поместить стержень из акрилового стекла или кювету с жидкостью на оптической скамье таким образом, чтобы зеркало вплотную прилегало к торцу стержня (кюветы) (см. рис. 2а).

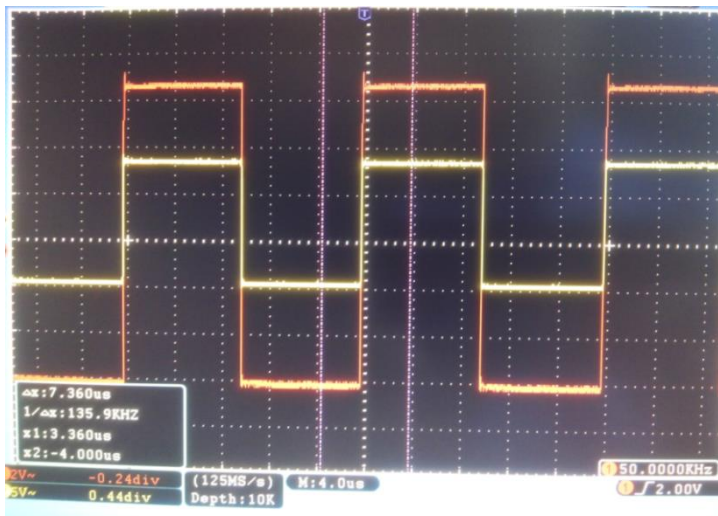


Рис.3. Синхронизация испущенного и принятого сигнала

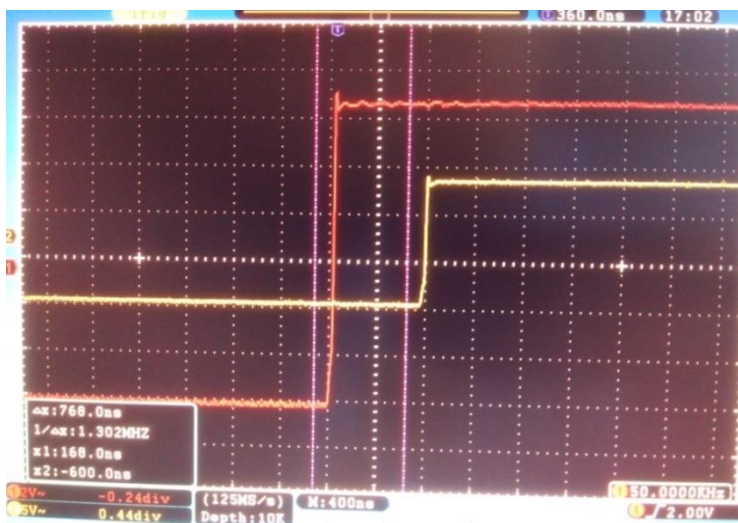


Рис.4. Сдвиг отраженного сигнала по времени

3. Включить прибор и осциллограф и произвести синхронизацию сигналов нажатием кнопки **Calibration**.

4. Снять стержень (кювету) с оптической скамьи, при этом синхронизация сигналов нарушается. Двигая зеркало вдоль оптической скамьи

Физика

(вправо), снова добиться синхронизации сигналов по времени. Записать в табл.2 новое положение зеркала x_2 на скамье по линейке. Рассчитать

$$\Delta x = x_2 - x_1.$$

5. Повторить измерения п.п. 1-4 для двух других начальных положений зеркала. Данные занести в таблицу.

6. Рассчитать показатель преломления и скорость света по формулам (2) и (3), найти их среднее значение. Рассчитать абсолютную и относительную погрешность, данные занести в табл.2. Записать окончательный результат.

7. Повторить п.п. 1-6 для кюветы с жидкостью. Данные занести в табл. 3.

Таблица 1

№	$\Delta x, м$	$\Delta t \cdot 10^{-8}, с$	$c, м/с$	$\Delta c, м/с$	$\delta c, \%$
1	0,1				X
2	0,2				
3	0,3				
4	0,4				
5	0,5				
Среднее					

Таблица 2

$l = \text{_____} м, \quad c = 3 \cdot 10^8 м/с$								
$x_1, м$	$x_2, м$	$\Delta x, м$	n	Δn	δn	$v, м/с$	$\Delta v, м/с$	$\delta v, \%$
0,5					X			X
0,6								
0,7								
Среднее								

Таблица 3

$l = \text{_____} м, \quad c = 3 \cdot 10^8 м/с$								
$x_1, м$	$x_2, м$	$\Delta x, м$	n	Δn	δn	$v, м/с$	$\Delta v, м/с$	$\delta v, \%$
0,5					X			X
0,6								
0,7								
Среднее								

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип независимости скорости света?
2. Каков физический смысл абсолютного показателя преломления?
3. В чем заключается принцип Ферма? Что называется оптической длиной пути?
4. Объясните, каким образом производятся измерения скорости света и показателя преломления в воздухе и прозрачной среде, выведите рабочие формулы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 013

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИН ВОЛН СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ГЕЛИЯ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ

Цель работы: определение длин волн спектральных линий гелия с помощью дифракционной решётки.

Оборудование: спектральные трубки с ртутью и гелием, источник высокого напряжения, отражательная дифракционная решётка, миллиметровая шкала, измерительная лента, держатели для спектральных трубок и дифракционной решётки.

Краткая теория

Дифракцией света называется явление отклонения света от прямолинейного распространения, когда свет, огибая края отверстия или препятствия, заходит в область геометрической тени. Дифракция наблюдается, если размеры отверстия или препятствия соизмеримы с длиной волны λ .

Проникновение световых волн в область геометрической тени может быть объяснено с помощью принципа Гюйгенса-Френеля [1].

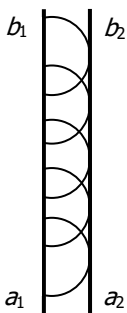


Рис. 1

Принцип Гюйгенса-Френеля: каждая точка фронта волны является источником когерентных вторичных сферических волн, интерференция которых определяет результирующую волну в следующий момент времени (рис. 1). Амплитуда вторичной сферической волны пропорциональна величине площади волновой поверхности, излучающей эту волну. Максимум излучения вторичных волн происходит в направлении нормали к волновой поверхности.

На рис. 1 линия a_1b_1 соответствует положению фронта волны в момент времени t_1 , a_2b_2 – положение фронта в момент $t_1 + \Delta t$.

Дифракционной решеткой называется совокупность большого числа одинаковых, отстоящих друг от друга на одно и то же расстояние щелей. Общая ширина щели a и непрозрачного промежутка b называется *постоянной (или периодом) решетки* d (рис. 2):

$$d = a + b.$$

Прозрачные дифракционные решетки обычно изготавливаются из стеклянных или кварцевых пластин, на поверхность которых наносится алмазным резцом ряд параллельных штрихов.

Физика

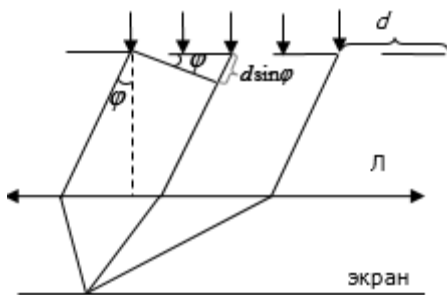


Рис. 2

Если на решетку нормально к её поверхности падает плоская монохроматическая волна с длиной λ , то в центральную точку экрана линзой Л соберутся лучи, для которых угол дифракции $\varphi_0 = 0$, амплитуды их волн сложатся арифметически, и интенсивность центрального максимума будет наибольшей.

Лучи, идущие под углом φ к первоначальному направлению от соответствующих мест каждой из двух соседних щелей, обладают разностью хода $d \sin \varphi$ (рис. 2). Волны усиливают друг друга, если эта разность хода равна целому числу длин волн.

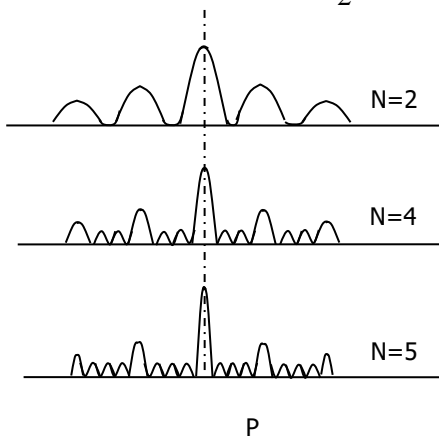
Условие наблюдения главных максимумов:

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots - \text{порядок максимума.}$$

При $m = 0$ имеем центральный максимум, при $m = \pm 1$ – имеем два максимума 1-го порядка, симметрично расположенные относительно центрального, и т. д. (рис. 3).

Очевидно, что в тех направлениях, в которых ни одна из щелей не распространяет свет, он не будет распространяться и при N щелях, т. е. главные минимумы интенсивности определяются условием:

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



Кроме того, вследствие взаимной интерференции световых лучей, посылаемых щелями, в некоторых направлениях они будут гасить друг друга, т. е. возникнут дополнительные минимумы.

Условие дополнительных минимумов:

$$d \sin \varphi = \pm m' \cdot \frac{\lambda}{N} \quad (m' \neq 0, N, 2N, \dots),$$

где m' может принимать все целочисленные значения, кроме 0, N , $2N, \dots$, т. е. кроме тех, при которых данное условие переходит в

условие главных максимумов.

В случае N щелей между соседними главными максимумами располагается $N-1$ дополнительных минимумов, разделенных вторичными максимумами, создающими весьма слабый фон. Чем больше щелей N , тем большее

количество световой энергии пройдет через решетку, тем больше минимумов образуется между соседними главными максимумами, тем более интенсивными и более острыми будут максимумы (рис. 3).

При пропускании через решетку белого света все максимумы, кроме центрального ($m = 0$), разложатся в спектр, фиолетовая область которого будет обращена к центру дифракционной картины. Это позволяет использовать дифракционную решетку как спектральный прибор для исследования спектрального состава света (определения длин волн и интенсивностей всех монохроматических компонентов).

Дифракционные решётки бывают прозрачные и отражательные. Теория отражательной дифракционной решётки ничем не отличается от теории прозрачной решётки [2,3].

Описание экспериментальной установки и методики выполнения работы

Экспериментальная установка представлена на рис.4, а принципиальная схема установки (вид сверху) и ход световых лучей при дифракции на отражательной дифракционной решётке представлены на рис. 5.

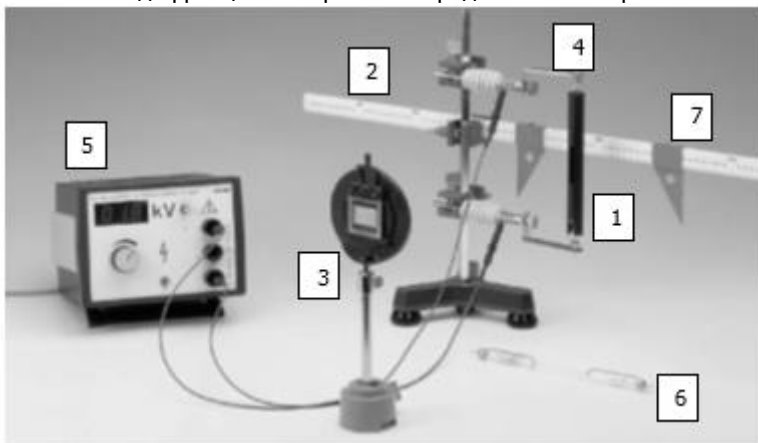


Рис. 4

1 – спектральная трубка в защитном кожухе; 2 – миллиметровая шкала; 3 – дифракционная решётка; 4 – держатели для трубок; 5 – источник высокого напряжения; 6 – спектральная трубка; 7 – пара курсоров для фиксирования положения спектральных линий.

В качестве источника излучения 1 используются поочерёдно спектральные трубки с ртутью и гелием. Трубка 1 крепится на установке вертикально с помощью двух держателей 4, по которым к ней подводится высокое напряжение ($2 \div 4 \text{ кВ}$) от источника 5. Шкала 2 располагается горизонтально непосредственно за трубкой и закрепляется на одном с ней штативе. Дифракционная решётка 3 устанавливается параллельно шкале на одной с ней

высоте так, чтобы излучение трубки попадало на решётку. Расстояние L между решёткой и трубкой должно быть примерно 40 см. Эксперимент производится в затемнённой комнате. Чтобы наблюдать дифракционный спектр, необходимо смотреть на шкалу через дифракционную решётку.

На рис. 5 x_1 и x_2 – положение симметричных главных максимумов первого порядка для одной из спектральных линий. Как видно из рисунка 5, расстояние между максимумами $2\ell = x_2 - x_1$, φ – угол дифракции.

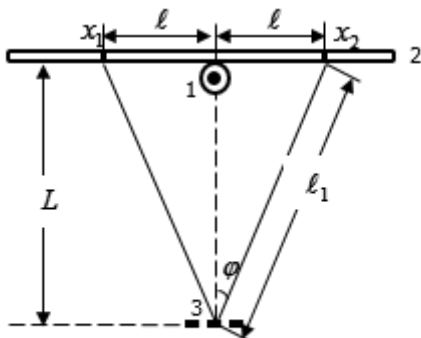


Рис. 5

Условие наблюдения главных максимумов при дифракции на дифракционной решётке:

$$d \sin \varphi = m\lambda,$$

где d – период решётки, φ – угол дифракции, m – порядок максимума.

Как видно из рисунка 5,

$$\sin \varphi = \frac{\ell}{\ell_1},$$

где $\ell_1 = \sqrt{\ell^2 + L^2},$

$$\ell = \frac{x_2 - x_1}{2}.$$

Следовательно, $\sin \varphi = \frac{\ell}{\sqrt{\ell^2 + L^2}}.$

Таким образом, для данной установки

$$d \cdot \frac{\ell}{\sqrt{\ell^2 + L^2}} = m\lambda, \tag{1}$$

$$d = \frac{m\lambda\sqrt{\ell^2 + L^2}}{\ell}. \tag{2}$$

Порядок выполнения работы

Задание 1. *Определение периода решётки с использованием спектра атомов ртути.*

1. Установить в держателе спектральную трубку с ртутью, включить источник высокого напряжения и, повышая напряжение, добиться стабильного свечения трубки.
2. Установить дифракционную решётку параллельно миллиметровой шкале на одной с ней высоте так, чтобы излучение трубки попадало на решётку. Расстояние L между решёткой и трубкой должно быть примерно 40 см.
3. Наблюдая, глядя через дифракционную решётку, дифракционную карти-

Физика

ну на миллиметровой шкале, найти положение двух симметрично расположенных максимумов первого порядка. Каждый максимум содержит три спектральные линии: жёлтую, зелёную, фиолетовую.

4. Определить по шкале положения x_1 и x_2 для каждой спектральной линии; данные занести в табл. 1.

Таблица 1

$m = 1, \quad L = \quad m$							
Цвет линии	$\lambda (м)$	$x_1 (м)$	$x_2 (м)$	$\ell (м)$	$d (м)$	$\Delta d (м)$	δd
жёлтая	$5,78 \cdot 10^{-7}$						X
зелёная	$5,61 \cdot 10^{-7}$						
фиолетовая	$4,348 \cdot 10^{-7}$						
среднее							

5. С помощью измерительной ленты определить расстояние L между решёткой и шкалой; данные занести в табл. 1.

6. Выключить источник высокого напряжения.

7. Вычислить по формуле (2) период решётки, его среднее значение

$$\langle d \rangle = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3},$$

абсолютные погрешности каждого измерения

$$\Delta d_i = |\langle d \rangle - d_i|,$$

среднюю абсолютную и относительную погрешности

$$\langle \Delta d \rangle = \frac{\sum_{i=1}^3 \Delta d_i}{3}; \quad \delta d = \frac{\langle \Delta d \rangle}{\langle d \rangle}.$$

8. Записать окончательный результат в виде

$$d = \langle d \rangle \pm \langle \Delta d \rangle.$$

Задание 2. *Определение длин волн спектральных линий в спектре гелия.*

1. Заменить спектральную трубку с ртутью спектральной трубкой с гелием. В спектре гелия каждый дифракционный максимум будет содержать четыре спектральные линии: красную, жёлтую, зелёную, фиолетовую.

2. Включить источник высокого напряжения и, повышая напряжение, добиться стабильного свечения трубки.

3. Повторить п. 2-6 задания 1, полученные данные занести в табл. 2.

Таблица 2

$m = 1, \quad \langle d \rangle = \quad m, \quad L = \quad m$							
№	Цвет линии	$x_1 (m)$	$x_2 (m)$	$\ell (m)$	$\lambda (m)$	$\delta\lambda$	$\Delta\lambda (m)$
1	красная						
2	жёлтая						
3	зелёная						
4	фиолетовая						

4. Как следует из формулы (1), при $m = 1$

$$\lambda = \frac{\langle d \rangle \cdot \ell}{\sqrt{\ell^2 + L^2}}, \quad (3)$$

где

$$\ell = \frac{x_2 - x_1}{2}. \quad (4)$$

Рассчитать по формуле (3) длины волн спектра гелия.

5. Рассчитать для каждой длины волны относительную погрешность измерения по формуле:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta\ell}{\ell} + \frac{\ell \cdot \Delta\ell + L \cdot \Delta L}{\ell^2 + L^2}$$

или

$$\delta\lambda = \delta d + \frac{\Delta\ell}{\ell} + \frac{\ell \cdot \Delta\ell + L \cdot \Delta L}{\ell^2 + L^2}. \quad (5)$$

В формуле (5) ΔL и $\Delta\ell$ – инструментальные погрешности измерительной ленты и миллиметровой шкалы. Для измерительной ленты $\Delta L = 0,5 \text{ мм}$ (половина цены наименьшего деления). Для миллиметровой шкалы, в соответствии с формулой (4):

$$\Delta\ell = \Delta x_1 + \Delta x_2 = 0,5 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм} = 1 \text{ мм}.$$

6. Поскольку $\delta\lambda = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$, то

$$\Delta\lambda = \lambda \cdot \delta\lambda. \quad (6)$$

Рассчитать по формуле (6) абсолютные погрешности измерений для всех длин волн.

7. Записать окончательный результат для каждой линии в виде:

$$\lambda_i = \lambda \pm \Delta\lambda.$$

Задание 3. Рассчитать номер последнего максимума для красной линии в спектре гелия, который можно наблюдать с помощью данной решётки.

Так как максимум наибольшего порядка в дифракционном спектре

Физика

m_{\max} будет наблюдаться при максимальном значении $\sin \varphi$, а предельное значение $\sin \varphi = 1$, то из условия наблюдения главных максимумов следует:

$$d \approx m_{\max} \cdot \lambda,$$

$$m_{\max} \approx \frac{d}{\lambda}.$$

В качестве m_{\max} берётся целая часть полученного числа.

Рассчитать m_{\max} по формуле:

$$m_{\max} \approx \frac{\langle d \rangle}{\lambda_{\text{красн}}}.$$

Задание 4. Определить общее число максимумов k , которые можно наблюдать для красной линии в спектре гелия с помощью данной решётки.

Как видно из рис. 3, полное число максимумов k складывается из нулевого максимума и всех остальных максимумов, расположенных симметрично относительно нулевого ($2m_{\max}$), т. е. определяется формулой:

$$k = 2m_{\max} + 1.$$

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой явление дифракции света?
2. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.
3. Что представляет собой дифракционная решетка?
4. Что такое период дифракционной решетки? Как его определить, зная длину решетки ℓ и число щелей N ?
5. Запишите условие наблюдения главных максимумов при дифракции на дифракционной решетке.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 014

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙЧАТЫХ СПЕКТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА

Цель работы: определение длин волн спектральных линий однократно ионизированного атома гелия с помощью дифракционной решётки и расчёт постоянной Ридберга.

Оборудование: спектральные трубки с ртутью и гелием, источник высокого напряжения, отражательная дифракционная решётка, миллиметровая шкала, измерительная лента, держатели для спектральных трубок и дифракционной решётки.

Краткая теория

Согласно Резерфорду, атом представляет собой систему зарядов, в центре которой расположено тяжелое положительное ядро с зарядом Ze размером $\sim 10^{-14}$ м, вокруг которого по орбитам движутся Z электронов.

Нильс Бор наделил ядерную модель атома Резерфорда новыми квантовыми свойствами. Для этого Бору пришлось ввести предположения, противоречащие классической механике и электродинамике, доказать которые он был не в состоянии и назвал их постулатами.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний): электрон в атоме может находиться только в некоторых определенных устойчивых *стационарных* состояниях. В стационарном состоянии атом не излучает и не поглощает энергию. Стационарным состояниям соответствуют стационарные орбиты электронов, для которых момент импульса электрона равен целому

кратному от $\hbar = \frac{h}{2\pi}$:

$$m_e v r_n = n \hbar \text{ – правило квантования орбит,}$$

где m_e – масса электрона, v – скорость электрона на орбите радиуса r_n , n – номер орбиты электрона, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Второй постулат Бора (правило частот): при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_n в другое – с энергией E_m происходит излучение или поглощение кванта с энергией

$$h\nu = E_n - E_m.$$

Постулаты Бора можно сформулировать и несколько проще.

1. Электроны в атоме движутся по строго определенным стационарным орбитам, не излучая и не поглощая при этом энергии; для стационарных орбит

$$m_e v r_n = n \hbar, \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

2. При переходе электрона с одной орбиты на другую атом излучает или поглощает энергию

Физика

$$h\nu = E_n - E_m,$$

где $h\nu$ – энергия фотона; E_n и E_m – энергии электрона на соответствующих орбитах.

Постулаты позволили Бору теоретически рассчитать энергетический спектр атома водорода и водородоподобных атомов – атомов, состоящих из ядра с зарядом Ze и одного электрона, движущегося вокруг ядра.

Согласно расчётам,

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{m_e Z^2 e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2} \quad (n=1,2,3,\dots),$$

где знак «минус» означает, что электрон находится в связанном состоянии.

Величину энергии электрона в атоме часто отождествляют с энергией атома. Все возможные значения энергии атома, которыми он может обладать, называют *энергетическими уровнями*. Энергетические уровни атома изображают в виде горизонтальных прямых, расположенных друг относительно друга на расстояниях, пропорциональных разности энергий атома (рис. 1). Самая низшая прямая соответствует нормальному состоянию атома; все остальные состояния *называются возбужденными*.

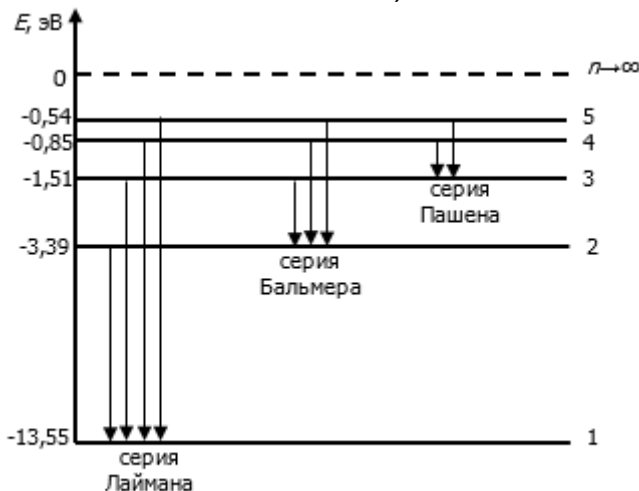


Рис. 1

Схема энергетических уровней атома водорода изображена на рис.1.

Используя теорию Бора и схему энергетических уровней атома, легко объяснить процессы испускания и поглощения излучения атомом.

Чтобы атом получил возможность испускать свет, его нужно возбудить, т.е. перевести электрон на более высокий энергетический уровень (нагреванием, освещением и т. д.). В возбужденном состоянии атом неустойчив и через $t \sim 10^{-8}$ с переходит на более близкую к ядру орбиту, испуская квант электромагнитного излучения (фотон) с энергией $E = h\nu$.

Согласно второму постулату Бора

$$h\nu = E_n - E_m = -\frac{m_e Z^2 e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

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

где $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$ – постоянная Ридберга.

Длина волны фотона

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{c}{RZ^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)} = \frac{1}{R' \cdot Z^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)}, \quad (2)$$

где $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ – скорость света в вакууме, $R' = \frac{R}{c}$ – также называется постоянной Ридберга.

Как видно из рис. 1, переходы электронов со всех вышележащих уровней на один определенный уровень образует серию линий.

Для *серии Лаймана* (ультрафиолетовая область спектра) $m=1$, $n=2,3,4,\dots$

Для *серии Бальмера* (видимая область спектра) $m=2$, $n=3,4,5,\dots$

Для *серии Пашена* (инфракрасная область спектра) $m=3$, $n=4,5,6,\dots$

Если электроны переходят на вышележащие уровни, наблюдаются спектры поглощения.

Формулу (1), описывающую все эти серии, называют обобщенной формулой Бальмера.

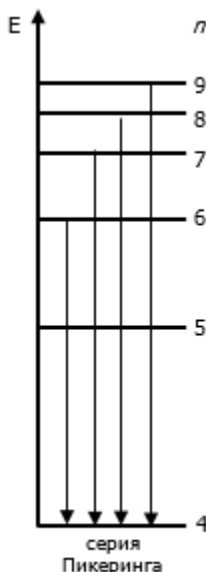


Рис. 2

Экспериментальные исследования спектров излучения разряженных газов показали, что для каждого газа характерен определенный спектр, состоящий из отдельных спектральных линий – *линейчатый спектр*. Для водородоподобного однократно ионизованного атома гелия He^+ ($Z=2$) имеется серия Пикеринга ($m=4$, $n=6,7,8,9$, рис. 2), расположенная в видимой области спектра. Лаймановская, бальмеровская и частично серия Пашена для He^+ лежат в ультрафиолетовой части спектра.

Серия названа по фамилии директора Гарвардской обсерватории, впервые исследовавшего линии этой серии. Серия Пикеринга была удачно объяснена именно в рамках планетарной модели атома.

Серия Пикеринга наблюдается и при газовом разряде в спектральной трубке с гелием,

когда в результате столкновения свободных электронов с атомами гелия происходит их ионизация, и возникают ионы He^+ . В настоящей работе с помощью дифракционной решётки определяются длины волн спектральных линий этой серии, а затем на основании формулы (2) рассчитывается постоянная Ридберга R' .

Описание экспериментальной установки и методики выполнения работы

Экспериментальная установка представлена на рис. 3, а принципиальная схема установки (вид сверху) и ход световых лучей при дифракции на отражательной дифракционной решётке представлены на рис. 4.

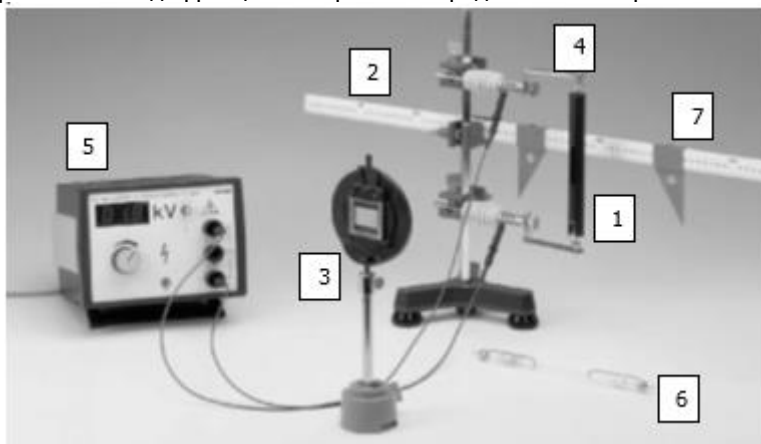


Рис. 3

1 – спектральная трубка в защитном кожухе; 2 – миллиметровая шкала; 3 – дифракционная решётка; 4 – держатели для трубок; 5 – источник высокого напряжения; 6 – спектральная трубка; 7 – пара курсоров для фиксирования положения спектральных линий.

В качестве источника излучения 1 используются поочерёдно спектральные трубки с ртутью и гелием. Трубка 1 крепится на установке вертикально с помощью двух держателей 4, по которым к ней подводится высокое напряжение ($2 \div 4 \text{ кВ}$) от источника 5. Шкала 2 располагается горизонтально непосредственно за трубкой и закрепляется на одном с ней штативе. Дифракционная решётка 3 устанавливается параллельно шкале на одной с ней высоте так, чтобы излучение трубки попадало на решётку. Расстояние L между решёткой и трубкой должно быть примерно 40 см. Эксперимент производится в затемнённой комнате. Чтобы наблюдать дифракционный спектр, необходимо смотреть на шкалу через дифракционную решётку.

На рис. 4 x_1 и x_2 – положение симметричных главных максимумов первого порядка для одной из спектральных линий. Как видно из рисунка 4, расстояние между максимумами $2\ell = x_2 - x_1$, φ – угол дифракции.

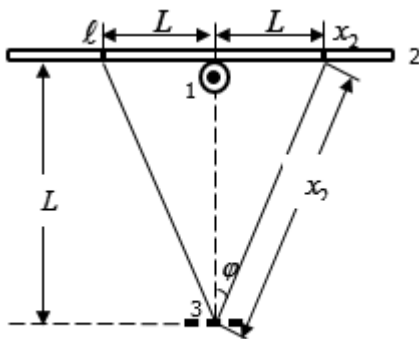


Рис. 4

Условие наблюдения главных максимумов при дифракции на дифракционной решётке:

$$d \sin \varphi = k \lambda ,$$

где d – период решётки, φ – угол дифракции, k – порядок максимума.

Как видно из рисунка 4,

$$\sin \varphi = \frac{\ell}{\ell_1} ,$$

где $\ell_1 = \sqrt{\ell^2 + L^2}$, $\ell = \frac{x_2 - x_1}{2}$.

Следовательно, $\sin \varphi = \frac{\ell}{\sqrt{\ell^2 + L^2}}$.

Таким образом, для данной установки

$$d \cdot \frac{\ell}{\sqrt{\ell^2 + L^2}} = k \lambda ,$$

$$d = \frac{k \lambda \sqrt{\ell^2 + L^2}}{\ell} . \quad (3)$$

Порядок выполнения работы

Задание 1. Определение периода решётки с использованием спектра атомов ртути.

1. Установить в держателе спектральную трубку с ртутью, включить источник высокого напряжения и, повышая напряжение, добиться стабильного свечения трубки.

2. Установить дифракционную решётку параллельно миллиметровой шкале на одной с ней высоте так, чтобы излучение трубки попадало на решётку. Расстояние L между решёткой и трубкой должно быть примерно 40 см.

3. Наблюдая, глядя через дифракционную решётку, дифракционную

Физика

картину на миллиметровой шкале, найти положение двух симметрично расположенных максимумов первого порядка. Каждый максимум содержит три спектральные линии: жёлтую, зелёную, фиолетовую.

4. Определить по шкале положения x_1 и x_2 для каждой спектральной линии; рассчитать $\ell = \frac{x_2 - x_1}{2}$; данные занести в табл. 1.

5. С помощью измерительной ленты определить расстояние L между решёткой и шкалой; данные занести в табл. 1.

6. Выключить источник высокого напряжения.

Таблица 1

$k = 1, \quad L = \quad m$							
Цвет линии	$\lambda (м)$	$x_1 (м)$	$x_2 (м)$	$\ell (м)$	$d (м)$	$\Delta d (м)$	δd
жёлтая	$5,78 \cdot 10^{-7}$						X
зелёная	$5,61 \cdot 10^{-7}$						
фиолетовая	$4,348 \cdot 10^{-7}$						
среднее							

7. Вычислить по формуле (3) период решётки, его среднее значение

$$\langle d \rangle = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3},$$

абсолютные погрешности каждого измерения

$$\Delta d_i = \left| \langle d \rangle - d_i \right|,$$

среднюю абсолютную и относительную погрешности

$$\langle \Delta d \rangle = \frac{\sum_{i=1}^3 \Delta d_i}{3}; \quad \delta d = \frac{\langle \Delta d \rangle}{\langle d \rangle}.$$

8. Записать окончательный результат в виде

$$d = \langle d \rangle \pm \langle \Delta d \rangle.$$

Задание 2. Определение длин волн серии Пикеринга в спектре He^+ и постоянной Ридберга.

1. Заменить спектральную трубку с ртутью спектральной трубкой с гелием. В спектре гелия He^+ каждый дифракционный максимум будет содержать четыре спектральные линии: красную, жёлтую, зелёную, фиолетовую.

2. Включить источник высокого напряжения и, повышая напряжение, добиться стабильного свечения трубки.

3. Повторить п. 2-6 задания 1, полученные данные занести в табл. 2.

Таблица 2

$k = 1, Z = 2, m = 4, \langle d \rangle = \quad \text{м}, L = \quad \text{м}$								
Цвет линии	$x_1(\text{м})$	$x_2(\text{м})$	$\ell(\text{м})$	$\lambda(\text{м})$	n	$R'(\text{м}^{-1})$	$\Delta R'(\text{м}^{-1})$	$\delta R'$
красная					6			X
жёлтая					7			
зелёная					8			
фиолетовая					9			
среднее								

4. Как следует из формулы (3), при $k = 1$

$$\lambda = \frac{\langle d \rangle \cdot \ell}{\sqrt{\ell^2 + L^2}}. \quad (4)$$

Рассчитать по формуле (4) длины волн спектра He^+ .

5. По формуле (5), полученной на основании формулы (2), рассчитать значение постоянной Ридберга:

$$R' = \frac{1}{Z^2 \lambda \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)}. \quad (5)$$

6. Найти её среднее значение $\langle R' \rangle$, среднюю абсолютную погрешность $\langle \Delta R' \rangle$, относительную погрешность

$$\delta R' = \frac{\langle \Delta R' \rangle}{\langle R' \rangle}.$$

7. Записать окончательный результат в виде:

$$R' = \langle R' \rangle \pm \langle \Delta R' \rangle.$$

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой модель атома Резерфорда?
2. Сформулируйте постулаты Бора.
3. Как возникают спектры излучения? спектры поглощения?
4. Запишите обобщенную формулу Бальмера для частоты излученного фотона. Поясните входящие в неё величины.
5. Запишите формулу для частоты излучения серии Лаймана для атома водорода. В какой области спектра расположена эта серия?
6. Запишите формулу для частоты излучения серии Бальмера для атома водорода. В какой области спектра расположена эта серия?

Физика

7. Запишите формулу для частоты излучения серии Пашена для атома водорода. В какой области спектра расположена эта серия?
8. Запишите формулу, выражающую взаимосвязь частоты и длины электромагнитной волны.
9. Изобразите схему энергетических уровней атома водорода и покажите на ней переходы, соответствующие сериям Лаймона, Бальмера, Пашена.
10. Что представляют собой линейчатые спектры и какие вещества их дают?

ЛИТЕРАТУРА

1. Т.И.Трофимова, А.В. Фролов, «Курс физики», т.2, изд. КноРус, 976 с., 2010г.
2. И.В.Савельев, «Курс общей физики», т.2, изд. КноРус, 1856 с., 2009г.
3. Г.С.Лансберг «Общий курс физики», т.3, изд. Наука, 928 с., 1976г.
4. В.Акоста и др. «Основы современной физики», изд. Просвещение, М., 1981.