

Лабораторная работа № 7 Изучение дифракции света с использованием оптического квантового генератора (ОКГ)

Цель работы: Ознакомиться с работой ОКГ. Определить длину волны излучения ОКГ с помощью дифракционной решётки, ширину щели и размеры частиц ликоподия¹ по дифракционным картинам.

Оборудование: гелий-неоновый лазер² ЛГН-208Б (или другой), прозрачная дифракционная решётка, щелевая диафрагма с микрометрическим винтом, тонкий слой ликоподия между двумя стёклами, оптическая скамья, экран.

Теоретическое введение

I. Оптический квантовый генератор

Действие лазеров основано на генерации и усилении света с помощью вынужденного (индуцированного) излучения.

Индукцированным называется излучение электромагнитных волн, которое возникает, если атомы переходят из возбуждённого состояния в основное под действием внешнего фотона. Если энергия фотона равна разности уровней энергии атома в возбуждённом и основном состояниях $E = E_m - E_1$, то после взаимодействия такого фотона с атомом возникают уже два когерентных фотона с энергией $h\nu$. Новый фотон, индуцированный в результате взаимодействия, имеет ту же частоту, что и вынуждающий фотон, и распространяется в том же направлении, то есть происходит усиление света.

Усиление света, проходящего через среду, будет длительным, если концентрация атомов вещества в возбуждённом состоянии (на верхних энергетических уровнях) больше, чем в основном (на нижних уровнях).

Такую среду называют активной, а её состояние – инверсной населённостью.

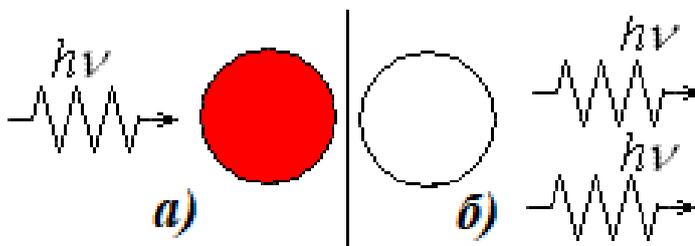


Рис. 7.1. Индуцированное излучение:
а) До излучения. Атом в возбуждённом состоянии.
б) После излучения. Атом в основном состоянии.

¹ Ликоподий – зрелые сухие споры плауна. Светло-жёлтый порошок. Используется в медицине (для обсыпки пилюль) и в литейном производстве (для обсыпки форм при фасонном литье). Диаметр частиц 29÷35 мкм.

² Лазер (оптический квантовый генератор) (аббревиатура слов английской фразы: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation — усиление света в результате вынужденного излучения) – источник оптического когерентного излучения, характеризующегося высокой направленностью и большой плотностью энергии.

Для обычной среды выполняется закон поглощения света Бугера³.

$$I = I_0 e^{-kl}, \quad (7.1.1)$$

где I_0 – интенсивность падающего света, k – коэффициент поглощения, l – толщина среды. Если $k > 0$, то интенсивность прошедшего света $I < I_0$.

Для активной среды $k < 0$ и $I > I_0$.

Распределение атомов по энергетическим уровням в состоянии термодинамического равновесия определяется законом Больцмана. Тогда

$$\frac{N_n}{N_m} = \frac{C \exp(-E_n / kT)}{C \exp(-E_m / kT)} = \exp\left(-\frac{E_n - E_m}{kT}\right), \quad (7.1.3)$$

где k – постоянная Больцмана, C – коэффициент пропорциональности, T – термодинамическая температура, n – номер верхнего уровня, m – номер нижнего уровня. Так как $E_n > E_m$, то в обычных условиях $N_n < N_m$. Если же $N_n > N_m$, то необходимо положить, что $T < 0$. Поэтому состояние вещества с инверсной населённостью формально называют состоянием с отрицательной термодинамической температурой, а среду неравновесной.

Процесс создания инверсного состояния называется накачкой.

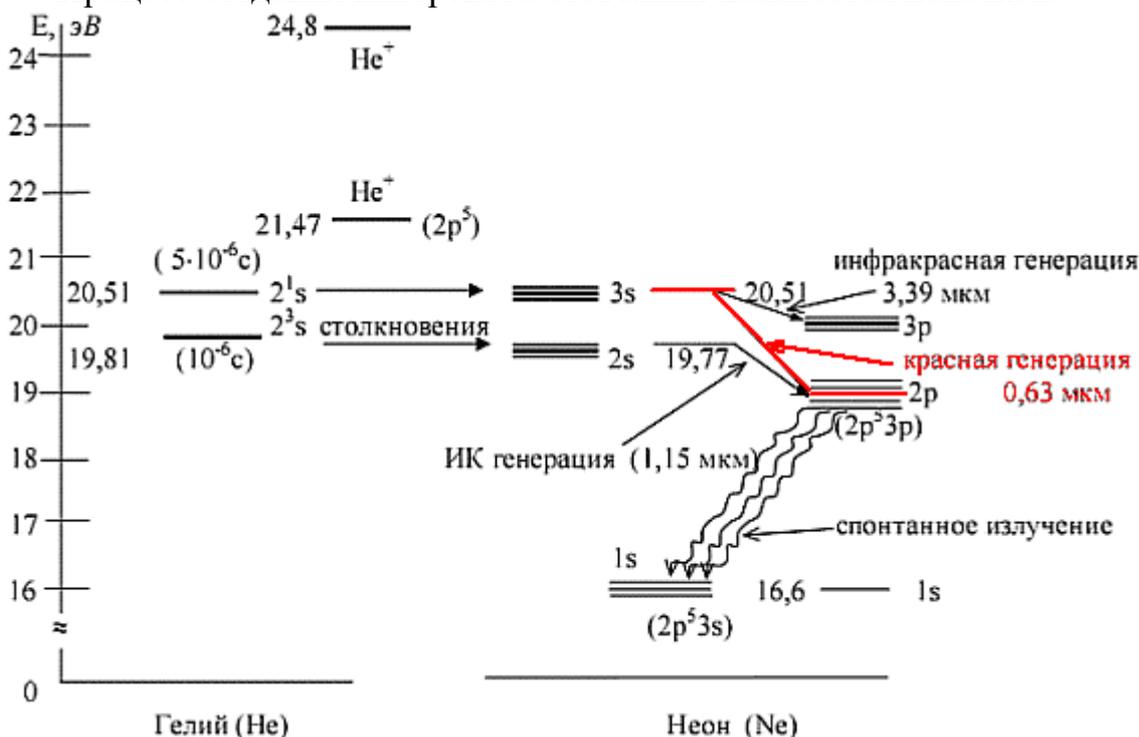


Рис. 7.2. Энергетические уровни He-Ne лазера

В гелий-неоновом лазере активной средой является смесь гелия и неона. Этот лазер имеет рабочую длину волны 632,8 нм, расположенную в красной части видимого спектра.

³ Бугёр Пьер (Pierre Bouguér) (16.02.1698-15.08.1758) — французский физик и астроном, основатель фотометрии. Известен трудами по теории корабля, геодезии, гидрографии и другим отраслям знания. Его имя внесено в список 72 величайших учёных Франции, помещённый на первом этаже Эйфелевой башни.

Рабочим телом лазера служит смесь гелия и неона в пропорции 5:1, находящаяся в стеклянной колбе под низким давлением. Парциальное давление гелия ≈ 1 мм рт. ст., неона $\approx 0,1$ мм рт. ст. Энергия накачки подаётся от двух электрических разрядников с напряжением около 1000 вольт, расположенных в торцах колбы.

Гелий-неоновые лазеры компактны, типичный размер резонатора — от 15 см до 0,5 м, их выходная мощность варьируется от 1 до 100 мВт.



Рис. 7.3. Устройство гелий-неонового лазера

Атомы неона являются излучающими (рабочими), но они не имеют метастабильных уровней. Атомы гелия имеют метастабильное возбуждённое состояние и служат для создания инверсной населённости атомов неона.

При электрическом разряде возбуждённые электронами атомы гелия, сталкиваясь с атомами неона, переводят их в возбуждённое состояние, обеспечивая инверсную населённость за счёт большей концентрации. Спонтанный (самопроизвольный) переход отдельных атомов неона с возбуждённого уровня на нижний уровень вызывает появление фотонов, которые при взаимодействии с другими атомами неона дают индуцированное излучение.



Рис. 7.4. ЛГ-78

Для увеличения мощности излучения разрядную трубку помещают в зеркальный резонатор. Отражаясь от зеркал, поток фотонов многократно проходит вдоль оси трубки, при этом в процесс включается всё большее число атомов неона, и интенсивность излучения возрастает. Лазер будет работать в режиме усиления света, если потери световой энергии при отражении от зеркал, поглощении средой и рассеянии на окнах трубки меньше, чем её прирост в результате прохождения через активную среду. В связи с этим очень важным параметром является качество зеркал и

чистота резонатора трубки. Резонатор газового лазера состоит из плоского и вогнутого зеркал с коэффициентом отражения $98 \div 99 \%$. Коэффициент пропускания зеркал соответственно равен $0,1 \%$ и 2% .

Разрядная трубка с торцов закрыта плоскопараллельными стеклянными пластинами, наклонёнными под углом Брюстера к оси трубки для создания линейной поляризации излучения.

Лазерное излучение обладает высокой направленностью, монохроматичностью, большой продольной и поперечной длиной когерентности. Поэтому газовый лазер является наиболее подходящим источником света для наблюдения дифракции.

II. Дифракционная решётка

Дифракционная решётка представляет собой прозрачную пластинку, на которую через равные промежутки нанесены параллельные непрозрачные штрихи. Величина $d = a + b$, где a – ширина щели, b – ширина штриха, называется периодом (или постоянной) решётки.

В работе используются дифракционные решётки с числом штрихов $N = 50$ или $N = 100$ на 1 мм (указывается на самой решётке). Следовательно, период дифракционной решётки

$$d(\text{мм}) = \frac{1}{N}. \quad (7.2.1)$$



Рис. 7.5

При падении света на решётку вторичные когерентные волны, образующиеся в результате дифракции, интерферируют, образуя на экране чёткую дифракционную картину. Главные дифракционные максимумы возникают при условии

$$d \sin \varphi_m = \pm m \lambda, \quad (7.2.2)$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ – порядок главных максимумов, φ_m – угол, под которым виден максимум m -го порядка, λ – длина волны излучения.

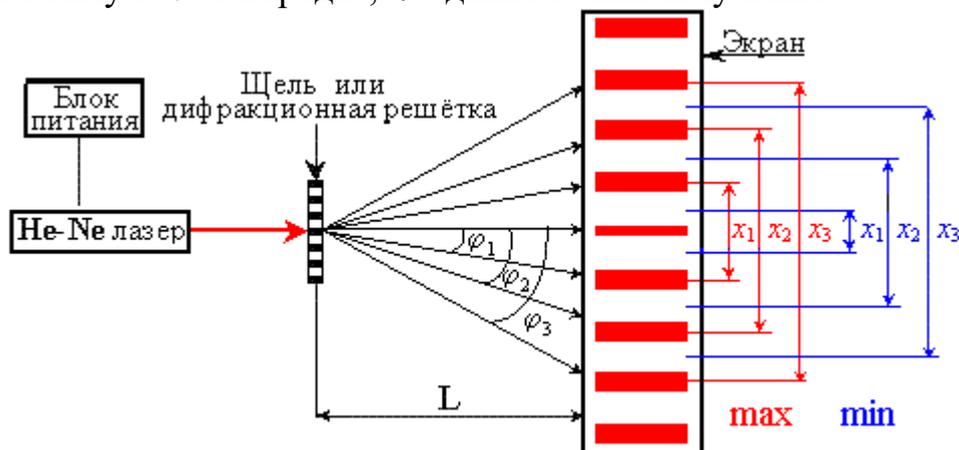


Рис. 7.6

Из рисунка и тригонометрических формул очевидно, что

$$\operatorname{tg} \varphi_m = \frac{x_m}{2L}, \quad \sin \varphi_m = \frac{\operatorname{tg} \varphi_m}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_m}}, \quad \text{или} \quad \sin \varphi_m = \sin \operatorname{arctg} \frac{x_m}{2L}. \quad (7.2.3)$$

Зная период решётки, расстояния между максимумами и от решётки до экрана, можно рассчитать длину волны падающего света по формуле

$$\lambda = \frac{d}{m} \sin \operatorname{arctg} \frac{x_m}{2L} = \frac{d}{m} \frac{x_m}{\sqrt{4L^2 + x_m^2}}. \quad (7.2.4)$$

III. Дифракция от щели

Дифракция света от одной щели с использованием лазера близка к случаю дифракции в параллельных лучах, если расстояние от щели до экрана достаточно большое. Предполагается, что источник света и точка наблюдения бесконечно удалены от щели, а распределение интенсивности света на экране достаточно просто рассчитывается аналитически [1, С.162].

Если монохроматическая световая волна падает на щель нормально к её плоскости, то амплитуда дифрагированной волны в точке наблюдения

$$A(\varphi) = A_0 \frac{\sin(x)}{x}, \quad x = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi, \quad (7.3.1)$$

где φ – угол дифракции, отсчитываемый от нормали к плоскости щели, a – ширина щели, λ – длина волны света, A_0 – амплитуда в центре дифракционной картины при $m = 0$.

Так как интенсивность света $I \sim A^2$, то распределение интенсивности на экране можно рассчитать по формуле

$$I(\varphi) = I_0 \frac{\sin^2(x)}{x^2}. \quad (7.3.2)$$

Условие минимумов

$$a \sin \varphi_m = \pm m \lambda, \quad m = 1, 2, \dots \quad (7.3.4)$$

Приближённое условие для всех максимумов, кроме нулевого, имеет вид

$$a \sin \varphi_m = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad m = 1, 2, \dots \quad (7.3.3)$$

Расстояние от центра дифракционной картины до первого минимума растёт с уменьшением a . Центральный максимум при этом расширяется и уменьшается по высоте. При $a \approx \lambda$ первый минимум уходит за пределы экрана. При увеличении ширины щели дифракционная картина сужается, главный максимум становится резче. При $a \gg \lambda$ на экране получаем чёткое изображение лазерного луча.

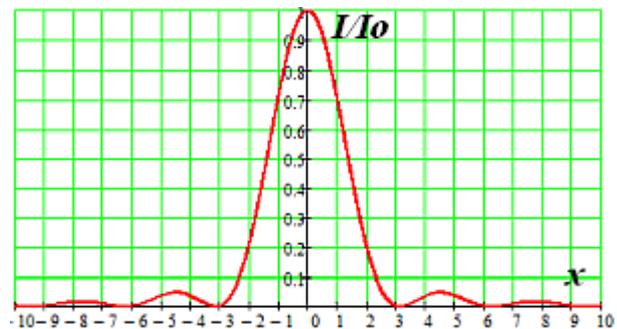


Рис. 7.7. Распределение интенсивности света от щели

IV. Дифракция от круглого препятствия

Дифракция света от непрозрачного круглого препятствия (или частицы) наблюдается в том случае, если размеры частиц малы по сравнению с расстоянием до экрана

$$d \ll \sqrt{2L\lambda}, \quad (7.4.1)$$

где d – диаметр частицы. Полученная дифракционная картина от одной частицы будет слабой на фоне прямого недифрагированного света. Для её усиления используется большое число хаотически расположенных одинаковых круглых частиц. Все они дают одинаковые дифракционные картины, сложение которых в плоскости экрана усиливает контраст. Обычно образец для наблюдения приготавливают в виде стеклянной пластинки с нанесённым на её поверхности тонким слоем порошка ликоподия. В этом случае дифракционную картину на экране можно представить в виде совокупности нескольких концентрических светлых и тёмных колец вокруг светлого центрального диска⁴.

В теории дифракции доказывается, что диаметр частиц, угол дифракции и длина волны связаны следующим соотношением [1. С.168]

$$d \sin \varphi_m = \pm f_m \lambda, \quad (7.4.2)$$

где f_m – некоторые коэффициенты. Из последнего выражения можно определить диаметр или радиус частиц. Нумерация начинается с первого тёмного кольца.

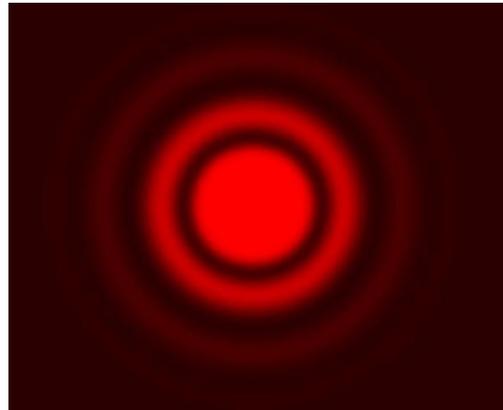


Рис. 7.8. Дифракция Эйри

Таблица 7.1

№	Тёмные кольца (нечётные)	№	Светлые кольца (чётные)
1	$R = \frac{0,610}{\sin \varphi_1^T} \lambda, \quad d = \frac{1,220}{\sin \varphi_1^T} \lambda$	2	$R = \frac{0,82}{\sin \varphi_2^C} \lambda, \quad d = \frac{1,640}{\sin \varphi_2^C} \lambda$
3	$R = \frac{1,116}{\sin \varphi_3^T} \lambda, \quad d = \frac{2,232}{\sin \varphi_3^T} \lambda$	4	$R = \frac{1,34}{\sin \varphi_4^C} \lambda, \quad d = \frac{2,680}{\sin \varphi_4^C} \lambda$
5	$R = \frac{1,619}{\sin \varphi_5^T} \lambda, \quad d = \frac{3,238}{\sin \varphi_5^T} \lambda$	6	$R = \frac{1,86}{\sin \varphi_6^C} \lambda, \quad d = \frac{3,720}{\sin \varphi_6^C} \lambda$
7	$R = \frac{2,12}{\sin \varphi_7^T} \lambda, \quad d = \frac{4,24}{\sin \varphi_7^T} \lambda$	8	

Интенсивность светлых колец убывает так быстро, что невооружённым глазом заметны только 2-3 первых кольца.

⁴ Сэр Джордж Биддель Эйри (Sir George Biddell Airy) (27.07.1801-02.01.1892) – британский математик и астроном.

V. Описание установки

Схема установки для изучения дифракции света приведена на рис. 7.9. Все детали располагаются на оптической скамье 1. Источником света является газовый гелий-неоновый лазер 2. Непосредственно на пути лазерного луча помещают дифракционную решетку 3, щель переменной ширины 4 или стеклянную пластинку с ликопидом 5 поочередно. Дифракционная картина наблюдается на экране 6.

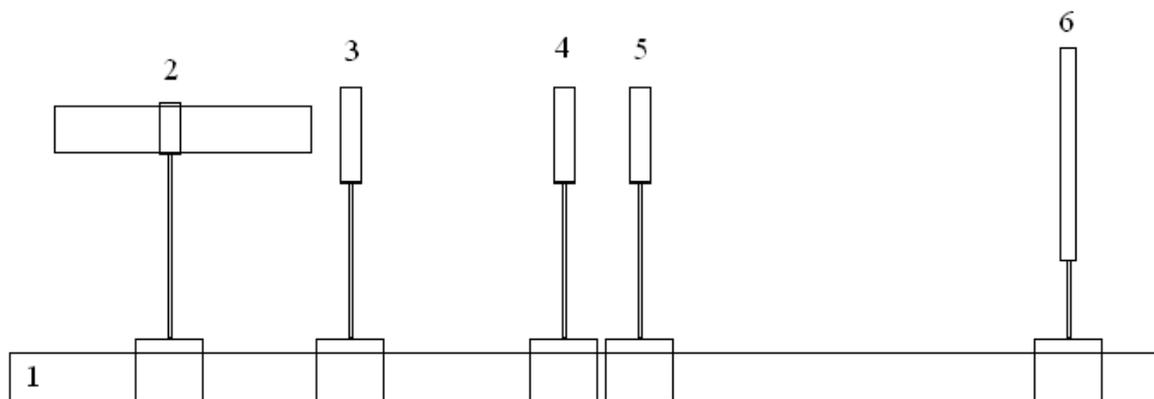


Рис. 7.9. Схема установки для наблюдения дифракции света

Плоскости оптических деталей и экрана необходимо установить перпендикулярно к направлению распространения лазерного излучения. Измерение расстояния между дифракционным элементом и экраном проводится с помощью измерительной ленты, размещённой вдоль оптической скамьи.



Рис. 7.10. Общий вид установки

Методика выполнения работы

Внимание! Работа проводится в тёмном помещении!

Не касаться поверхностей дифракционных элементов руками!

I. Определение длины волны излучения лазера

по положению главных максимумов дифракционной решетки

1. На оптической скамье установить лазер, дифракционную решётку и экран. **На экране закрепить лист бумаги.** Плоскости решётки и экрана должны быть перпендикулярны направлению распространения света.
2. Включить лазер и направить луч параллельно оптической скамье на дифракционную решетку. При правильном расположении элементов установки на экране получается симметричная относительно центрального дифракционного максимума нулевого порядка дифракционная картина, состоящая из чётких максимумов (рис. 7.6).
3. Подобрать расстояние L от дифракционной решётки до экрана так, чтобы на экране были видны максимумы до 4-го порядка включительно. Нанести положения максимумов на закреплённый лист бумаги карандашом. Выключить лазер.
4. Зная число штрихов на 1 мм N (написано на самой решётке), рассчитать её период d и внести данные в лист отчёта.
5. Внести расстояние L в лист отчёта.
6. Используя линейку, определить расстояния x_m между центрами главных дифракционных максимумов $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4$ порядков (рис. 7.6). Результаты внести в таблицу 1.
7. Рассчитать $\operatorname{tg} \varphi_m$ и $\sin \varphi_m$ по формулам (7.2.3).
8. Для каждого случая вычислить длину волны лазера по формуле (7.2.4).
8. Вычислить среднее значение длины волны. Оценить погрешности.
9. Сравнить результат с паспортным значением. Сделать выводы.
- 10^{*5}. Для каждого максимума рассчитать погрешности длины волны как для косвенных измерений.

⁵ Дополнительное задание для студентов физических специальностей

II. Изучение дифракции света от одной щели переменной ширины

1. На оптической скамье установить лазер, щель переменной ширины с микрометрическим винтом и экран. **На экране закрепить лист бумаги.** Плоскости щели и экрана должны быть перпендикулярны направлению распространения света.
2. Включить лазер и направить луч параллельно оптической скамье на середину щели. Получить на экране отчётливую дифракционную картину, для чего предварительно установить ширину щели $\approx 0,10$ мм. При правильном расположении элементов установки на экране получается симметричная относительно центрального дифракционного максимума нулевого порядка дифракционная картина (рис. 7.6).
3. Подобрать расстояние от щели до экрана L и ширину щели a (только с помощью лаборанта!) так, чтобы на экране были видны максимумы до 4-го порядка включительно. Нанести положения максимумов на закреплённый лист бумаги карандашом. Выключить лазер.
4. Определить ширину щели a по барабану микрометрического винта и расстояние L от щели до экрана. Внести данные в лист отчёта.
5. Используя линейку, определить расстояния между центрами главных дифракционных максимумов x_m^{\max} и минимумов x_m^{\min} до 4-ого порядка (рис. 7.6). Результаты внести в таблицу 2.
6. Рассчитать $\operatorname{tg} \varphi_m$ и $\sin \varphi_m$ по формулам (7.2.3).
7. Для каждого случая вычислить ширину щели по формулам
Для минимумов $a^{\min} = m \frac{\lambda}{\sin \varphi_m}$, для максимумов $a^{\max} = \frac{(2m+1)}{2} \frac{\lambda}{\sin \varphi_m}$.
8. Вычислить среднее значение ширины щели. Оценить погрешности.
9. Сравнить результаты. Сделать выводы.

Для студентов физических специальностей

При использовании расчётов по максимумам есть более точные формулы.

$$a^{\max} = 1,4303 \frac{\lambda}{\sin \varphi_1},$$

$$a^{\max} = 2,4590 \frac{\lambda}{\sin \varphi_2},$$

$$a^{\max} = 3,4709 \frac{\lambda}{\sin \varphi_3},$$

$$a^{\max} = 4,4774 \frac{\lambda}{\sin \varphi_4}.$$

Провести расчёты по этим формулам. Сравнить результаты.

III. Изучение дифракции света при прохождении через тонкий слой частиц малого радиуса

1. На оптической скамье установить лазер, двойную стеклянную пластину со слоем ликоподия и экран. **На экране закрепить лист бумаги.** Плоскости пластинки и экрана должны быть перпендикулярны направлению распространения света.
2. Включить лазер и направить луч параллельно оптической скамье на пластинку с ликоподием. При правильном расположении элементов установки на экране получается дифракционная картина, состоящая из чередующихся светлых и тёмных колец (рис. 7.7).
3. Поворотом стеклянной пластины вокруг оси подобрать её положение так, чтобы дифракционная картина была наиболее отчётливой.
4. Подобрать расстояние от пластины с ликоподием до экрана так, чтобы на экране были видны не менее 2-х тёмных и 2-х светлых колец. Зарисовать получившуюся дифракционную картину на закреплённом листе бумаги карандашом. Выключить лазер.
5. Определить расстояние L от пластины с ликоподием до экрана.
6. Определить среднее значение диаметра $D_{m\text{cp}}$ каждого из первых двух тёмных и светлых колец на экране, измеренных во взаимно перпендикулярных направлениях: горизонтальном и вертикальном.
7. Рассчитать $\text{tg } \varphi_m$ и $\sin \varphi_m$ по формулам (7.2.4), где $x_m = D_{m\text{cp}}$
8. Оценить диаметр частиц ликоподия, используя формулы таблицы 7.1.
9. Вычислить среднее значение диаметра частиц. Оценить погрешности.
10. Сравнить результаты. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.
2. Какое явление называют дифракцией света? Приведите примеры дифракционных явлений.
3. В чем состоит различие между дифракцией Френеля и Фраунгофера?
4. Объясните появление пятна Пуассона.
5. При каком условии в центре дифракционной картины от круглого отверстия будет наблюдаться темное пятно?
6. Объясните дифракцию от частиц ликоподия.

Дополнительная литература

1. Гелий-неоновый лазер. [Электронный ресурс] URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D0%B9-%D0%BD%D0%B5%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%BB%D0%B0%D0%B7%D0%B5%D1%80.

Лабораторная работа № 7. Лист отчёта
Изучение дифракции света
с использованием оптического квантового генератора (ОКГ)

Выполнил студент _____
 Факультет _____ курс _____ группа _____
 Проверил _____
 Показания сняты _____
 Зачтено _____

Погрешности измерительных приборов. $\alpha =$ _____ %.

Измерительный прибор	ω – цена деления	$\Delta_{\text{окр}}$ – округления	$\Delta_{\text{пр}}$ – приборная	$\Delta_{\text{суб}}$ – субъективная	Единицы измерения
Измерит лента	1			2	мм
Линейка	1			5	мм

Примечание: большая субъективная погрешность связана с субъективным определением положения максимума.

I. Определение длины волны излучения лазера
по положению главных максимумов дифракционной решетки

$N =$ (____ \pm ____) 1/мм, $\varepsilon_N =$ ____ % $L =$ (____ \pm ____) мм, $\varepsilon_L =$ ____ %
 $d =$ (____ \pm ____) мм, $\varepsilon_d =$ ____ %

Таблица 1

m	x_m , мм	$\text{tg}(\varphi_m)$	$\sin(\varphi_m)$	λ , нм	$\Delta\lambda$, нм
1					
2					
3					
4					
$\bar{\lambda} =$					
$\varepsilon_{\bar{\lambda}} =$					

ε_x	ε_L	$\Delta\lambda$, нм

Сравнение: $\lambda =$ (____ \pm ____) нм, $\varepsilon_\lambda =$ ____ %.
 $\lambda_{\text{расч}} =$ (____ \pm ____) нм, $\varepsilon_\lambda =$ ____ %.

II. Изучение дифракции света от одной щели переменной ширины

$a =$ (____ \pm ____) мм, $\varepsilon_a =$ ____ % $L =$ (____ \pm ____) мм, $\varepsilon_L =$ ____ %

Таблица 2

m	МИНИМУМЫ					МАКСИМУМЫ				
	x_{min} , мм	$\text{tg}(\varphi_m)$	$\sin(\varphi_m)$	a , мм	Δa , мм	x_{max} , мм	$\text{tg}(\varphi_m)$	$\sin(\varphi_m)$	a , мм	Δa , мм
1										
2										
3										
4										
среднее						среднее				

Сравнение: $a =$ (____ \pm ____) мм, $\varepsilon_a =$ ____ %.
 $a_{\text{min}} =$ (____ \pm ____) мм, $\varepsilon_a =$ ____ %.
 $a_{\text{max}} =$ (____ \pm ____) мм, $\varepsilon_a =$ ____ %.

**III. Изучение дифракции света
при прохождении через тонкий слой частиц малого радиуса**

$$L = (\text{---} \pm \text{---}) \text{ мм}, \quad \varepsilon_L = \text{---} \%$$

Таблица 3

кольца	D_r , мм	D_B , мм	D_{cp} , мм	$\text{tg}(\varphi_m)$	$\sin(\varphi_m)$	f_m	d , мкм	Δd , мкм
1 тёмное						1,220		
1 светлое						1,640		
2 тёмное						2,232		
2 светлое						2,680		
3 тёмное						3,238		
3 светлое						3,720		
						среднее		

Сравнение:

$$d = (\text{---} \pm \text{---}) \text{ мкм}, \quad \varepsilon_d = \text{---} \%. \\ d_{\text{табл}} = (\text{---} \pm \text{---}) \text{ мкм}, \quad \varepsilon_d = \text{---} \%.$$