

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники

**А.Д. Безпальный, А.Е. Мандель, Д.В. Окунев**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ГЕЛИЙ–НЕОНОВОГО ЛАЗЕРА**

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов технических направлений подготовки и специальностей

Томск  
2025

УДК 535:530.145

ББК 22.343

Б–39

**Рецензент:**

**Хатьков Н.Д.**, доцент кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
ТУСУР, канд. техн. наук

**Авторы:**

А. Д. Безпальный, А. Е. Мандель, Д. В. Окунев

**Безпальный, Александр Дмитриевич**

Б-39 Исследование основных параметров гелий-неонового лазера: методические указания к лабораторной работе для студентов технических направлений подготовки и специальностей / А.Д. Безпальный, А.Е. Мандель, Д.В. Окунев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025. – 17 с.

В методических указаниях изложены принципы работы и устройство газового He-Ne-лазера. Описана экспериментальная установка и методика проведения лабораторной работы. В ходе выполнения работы студенты закрепляют теоретические знания об устройстве газовых лазеров и их основных параметрах: угловой расходимости, длины волны и поляризации излучения.

Методические указания предназначены для студентов технических направлений подготовки и специальностей.

Одобрено на заседании каф. СВЧиКР протокол № 6 от 14.02.2025 г.

УДК 535:530.145

ББК 22.343

© Безпальный А. Д., Мандель А. Е., Окунев Д. В., 2025

© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ .....	5
1.1 Устройство и принцип действия He-Ne лазера .....	5
1.2 Типы колебаний, расходимость, поляризация излучения .....	6
2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	9
3 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ .....	10
4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	11
5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	15
6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	16
Список литературы .....	17

## Введение

В газовых лазерах рабочее вещество находится в газообразном состоянии. Это может быть газ, смесь газов или пары различных металлов. Рабочее вещество может представлять собой как однокомпонентный газ, так и газ, находящийся в атомарном или в молекулярном состоянии. Кроме того газ может представлять как совокупность нейтральных частиц, так и их ионов. Число ионов, атомов и молекул, на которых уже получена генерация, превысило 100 и растет дальше, а диапазон частот газовых лазеров простирается от ультрафиолетового до инфракрасного. Наиболее ярким представителем атомарных газовых лазеров является гелий-неоновый лазер (He-Ne). Несмотря на то, что в настоящее время описаны десятки газовых лазеров, он остается наиболее простым, доступным и распространенным в практической деятельности лазерным устройством.

Целью данной работы является ознакомление с конструкцией газового He-Ne-лазера и исследование его основных параметров: угловой расходимости, длины волны и поляризации излучения.

# 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

## 1.1 Устройство и принцип действия He-Ne лазера

Гелий-неоновый лазер является одним из первых построенных квантовых приборов оптического диапазона. Устройство гелий-неонового лазера поясняется рисунком 1.1.

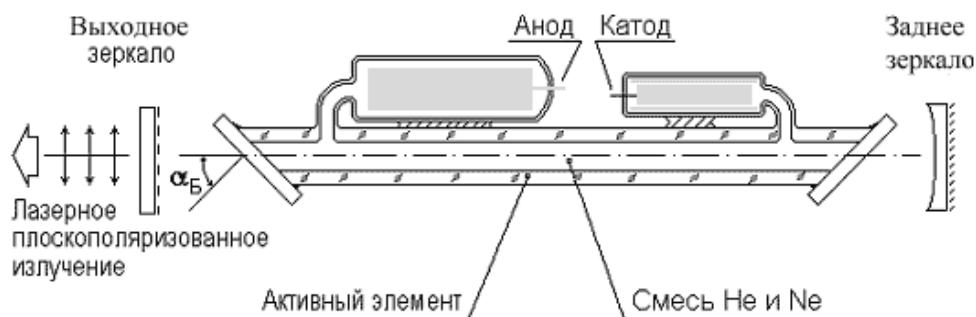


Рисунок 1.1 – Устройство гелий-неонового лазера

Основным элементом оптического квантового генератора (ОКГ) является газоразрядная трубка, заполненная смесью гелия (*He*) и неона (*Ne*). Торцы трубки скошены под углом Брюстера так, что отражение от них излучения с вертикальной поляризацией сведено к нулю. Трубка помещается в оптический резонатор Фабри-Перо, образованный зеркалами. Питание трубки и поддержание в ней разряда осуществляется генератором накачки, представляющим источник постоянного напряжения.

Для получения состояния с инверсией населенностей в газовом лазере используется метод неупругих соударений в двухкомпонентной газовой среде. Суть этого метода заключается в следующем. Пусть в разрядной трубке имеется смесь двух газов: вспомогательного (примесного) и рабочего. Вспомогательный газ имеет два энергетических уровня, а рабочий – три (рисунок 1.2).

Согласно закону Больцмана, в состоянии теплового равновесия для энергетических уровней, разделенных частотами оптического диапазона, все атомы рабочего и примесного газов находятся на первых энергетических уровнях. Когда в трубке возбуждается разряд, часть атомов обоих газов переводится в возбужденные состояния (на верхние энергетические уровни).

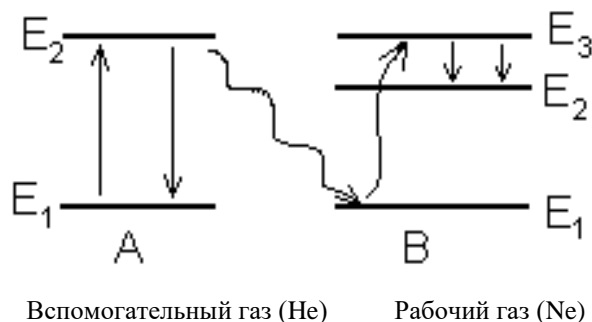


Рисунок 1.2 – Энергетические уровни смеси двух газов

Уровень  $E_2$  примесного газа является метастабильным (обладает большим временем жизни) и поэтому на нем происходит постепенное накопление возбужденных атомов. Последние, сталкиваясь с невозбужденными атомами рабочего газа, передают им свою энергию, совершая одновременно переход на основной уровень  $E_1$ . Невозбужденный атом рабочего газа, получив при столкновении энергию, переходит на третий уровень. Таким образом, происходит резонансное заселение уровня  $E_3$ , уровень  $E_2$

остаётся практически пустым и на переходе  $E_3 \rightarrow E_2$  возникает инверсия населенностей. Для того, чтобы процесс резонансного заселения был эффективней, число атомов примесного газа в смеси делают больше, чем у рабочего.

Упрощенная энергетическая диаграмма атомов He и Ne приведена на рисунке 1.3. Атомы гелия являются примесными и имеют диаграмму уровней, изображенную на рисунке 1.3 слева.

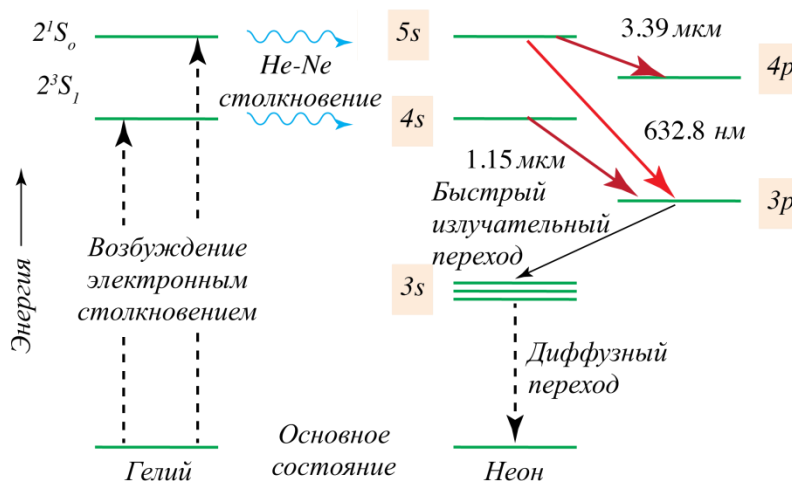


Рисунок 1.3 – Энергетическая диаграмма атомов He и Ne

В результате неупругих соударений атомов He и Ne населенности уровней  $2S$  и  $3S$  неона возрастают, а уровней  $2P$  и  $3P$  неона остаются малыми. Время жизни уровней  $2S$  и  $3S$  у Ne больше, чем уровней  $2P$  и  $3P$ . Поэтому при некотором токе разряда, при правильно подобранных давлениях He и Ne в смеси, можно получить инверсию населенностей в переходах  $3S - 3P$  (инфракрасное излучение  $\lambda=3,39 \mu\text{m}$ ),  $2S - 2P$  (инфракрасное излучение  $\lambda=1,15 \mu\text{m}$ ) и  $3S - 2P$  (красный свет  $\lambda=0,63 \mu\text{m}$ ).

При наличии в Ne состояния с инверсией населенностей и создания с помощью зеркал резонатора положительной обратной связи, генератор самовозбуждается и излучает на длине волны  $\lambda=0,63 \mu\text{m}$ ,  $1,15 \mu\text{m}$  или  $3,39 \mu\text{m}$  в зависимости от того, на какой из них оптимален коэффициент отражения зеркал.

Процесс самовозбуждения лазера можно упрощенно описать следующим образом: шумовое спонтанное излучение частиц, по мере распространения вдоль газоразрядной трубки, стимулирует индуцированные переходы с метастабильных уровней. Таким образом, проходя через трубку, световое поле усиливается, причем доля индуцированного излучения в нем возрастает. Зеркала, играющие роль резонатора, позволяют за счет многократных отражений светового поля увеличить время взаимодействия излучения и активных частиц. Если возникающее в результате таких многократных проходов индуцированное излучение способно компенсировать все потери резонатора, то выполняется одно из основных условий самовозбуждения – баланс амплитуд. Второе условие – баланс фаз – выполняется автоматически для всех резонансных частот резонатора. Самовозбуждение наступает на тех резонансных участках, на которых коэффициент усиления среды оказывается достаточным для выполнения баланса амплитуд.

## 1.2 Типы колебаний, расходимость, поляризация излучения

Поглощение и усиление поля в квантовом генераторе возможно не на одной частоте, а в некоторой полосе частот, которая для перехода  $E_5 \rightarrow E_3$  составляет около

1000 МГц. Контур линии поглощения (усиления) имеет вид гауссовой кривой (рисунок 1.4). На этом же рисунке на оси частот нанесены резонансные частоты резонатора  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  и т.д.

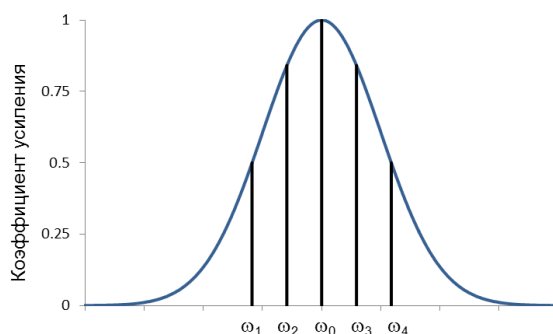


Рисунок 1.4 – Зависимость коэффициента усиления от частоты

На каждой из частот  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  поле (мода) характеризуется своим пространственным распределением. Различают два вида колебаний: аксиальные или продольные типы колебания, неаксиальные или поперечные. Поле первых из них не зависит от поперечных координат. Поле вторых имеет хотя бы вдоль одной из поперечных координат два или большее число максимумов. Как и в “обычных” закрытых резонаторах тип колебаний задается тремя индексами  $m$ ,  $n$ ,  $q$ . Индекс  $q$  указывает число полуволн, укладываемых вдоль оси резонатора от зеркала до зеркала. Индексы  $m$  и  $n$  указывают число вариантов поля укладываемых вдоль поперечных координат. В случае прямоугольных зеркал, и при малых потерях в резонаторе, распределение поля моды с индексами  $m$ ,  $n$ ,  $q$  может быть описано формулой:

$$\Psi_{mnq} = \Psi_0 \cdot \sin \frac{q\pi}{L} z \cdot \frac{\sin (m+1)\pi}{\cos \frac{2a}{2a}} x \cdot \frac{\sin (n+1)\pi}{\cos \frac{2b}{2b}} y, \quad (1.1)$$

где  $L$  – расстояние между зеркалами;  $2a$  и  $2b$  – размеры светового пучка в поперечном сечении, начало координат находится в центре зеркала и функция  $\cos$  берется для  $m, n$  – четного; а  $\sin$  – для  $m, n$  – нечетного. Структура поля в поперечной плоскости для простейших типов колебаний изображена на рисунке 1.5.

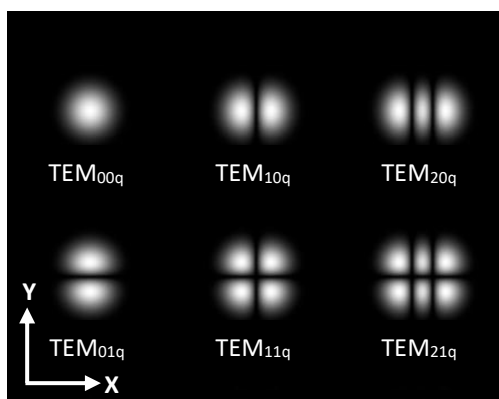


Рисунок 1.5 – Структура поля в поперечной плоскости

Моды  $TEM_{00q}$ , как следует из рисунка 1.5, являются аксиальными модами, все остальные моды - поперечные.

Распределение мод по частоте имеет следующий характер. Аксиальные моды приблизительно равноотстоят друг от друга. Расстояние между соседними аксиальными модами равно:

$$\Delta f = \frac{c}{2L}. \quad (1.2)$$

Поперечные моды расположены вблизи аксиальных типов. Расстояние между ними измеряется сотнями кГц и не превышает нескольких МГц. Таким образом, ширина спектра газового лазера  $\Delta f$ , в основном, определяется числом генерируемых продольных мод и, если число таких мод равно  $n$ , то

$$\Delta f = n \cdot f_0. \quad (1.3)$$

Важным параметром газового лазера является угловая расходимость его луча. Высокая степень пространственной когерентности излучения лазера определяет его малую расходимость. Излучение лазера представляет собой почти параллельный пучок с очень небольшой расходимостью, характеризуемой плоским углом расхождения  $\theta$ . Минимально достижимый угол расхождения пучка лазера ограничивается явлениями дифракции и вычисляется по формуле:

$$\theta = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d}. \quad (1.4)$$

где  $d$  – диаметр апертуры излучателя.

Газовые лазеры имеют наименьший угол расхождения пучка излучения по сравнению с твердотельными и полупроводниковыми лазерами. Величина  $\theta$  у газовых лазеров составляет порядка нескольких угловых минут.

## 2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрим экспериментальную установку, используемую для определения следующих параметров: расходимости, длины волны и поляризации излучения He-Ne лазера.

He-Ne лазер, конструкция которого приведена на рисунке 2.1, излучает линейно поляризованный свет, хотя сами атомы излучают свет произвольной поляризации. Выделению поляризации способствуют выходные торцы газоразрядной трубки, скошенные под углом Брюстера.

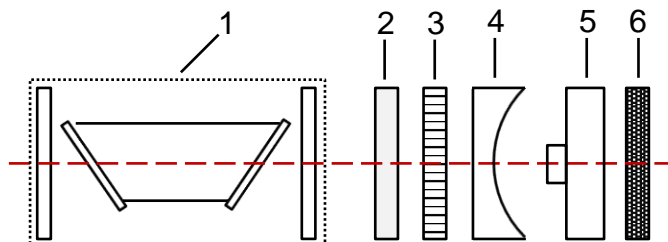


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки: 1 – газовый лазер; 2 – поляроид; 3 – дифракционная решетка; 4 – рассеивающая линза; 5 – фотоприемник; 6 – экран

В состав установки, кроме указанных на рисунке, входят следующие устройства и элементы: рельс, линзы, поляроид, дифракционная решетка, фотоприемник, экран и другие приспособления.

Лазер является источником узконаправленного монохроматического излучения в видимой ( $\lambda = 0,63$  мкм) области спектра. Он выполнен в виде двух блоков: устройства, содержащего активный элемент (газоразрядную трубку), оптический резонатор и блока питания. Оптический резонатор лазера образован сферическим зеркалом и плоским.

**Активный элемент** – газоразрядная трубка с анодом и подогревным катодом, наполненная газовой смесью He-Ne. Торцы трубки закрыты плоскими стеклянными окнами (из оптического кварцевого стекла), наклоненными под углом Брюстера. Выход излучения осуществляется со стороны плоского зеркала.

**Источник питания.** Разряд в активном элементе возбуждается от стабилизированного источника тока, снабженного системой поджига. Конструктивно стабилизатор выполнен в виде отдельного блока.

**Линзы** используются для проекции на экран увеличенной картины излучения лазера и измерения пространственного распределения интенсивности светового поля.

**Дифракционная решетка** используется для определения длины волны лазера.

**Поляроид** необходим для определения вида поляризации лазера.

**Фотоприемник** используется для измерения мощности генерируемого лазером излучения.

**Экран** используется для наблюдения картины излучения лазера, проекции дифракционных картин и т.д.

### 3 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

- 3.1 Измерить пространственное распределение интенсивности светового поля с помощью фотоприемника на расстоянии  $L$  от линзы.
- 3.2 Определить рабочую моду лазера.
- 3.3 Определить величину расходимости плоского угла  $\theta$  лазерного луча.
- 3.4 Измерить длину волны  $\lambda$  излучения лазера.
- 3.5 Определить плоскость поляризации лазерного излучения.

## 4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с целью работы, теоретическим материалом, описанием экспериментальной установки и пройти инструктаж по технике безопасности.

**Лабораторную работу необходимо выполнять в защитных очках!**

1. Ознакомиться со схемой экспериментальной установки и конструкцией лазера (рисунок 2.1).
2. Включить лазер.
3. Убедиться в наличии генерации. В случае неисправной работы устройства сообщить преподавателю!

### 4. Определение рабочей моды лазера.

Вид поперечного распределения светового поля (модового состава) на выходном зеркале лазера зависит от взаимного расположения зеркал резонатора. В результате структура поля в поперечной плоскости может иметь от одного до нескольких максимумов (рисунок 1.5).

#### Порядок выполнения пункта 4.

- 4.1 Поместить на скамью экран так, чтобы на него падал луч лазера.
- 4.2 Установить сферическую линзу перед экраном на расстоянии  $L$  (рисунок 4.1). Диаметр светового поля на экране после линзы должен составлять от 10 до 20 мм.

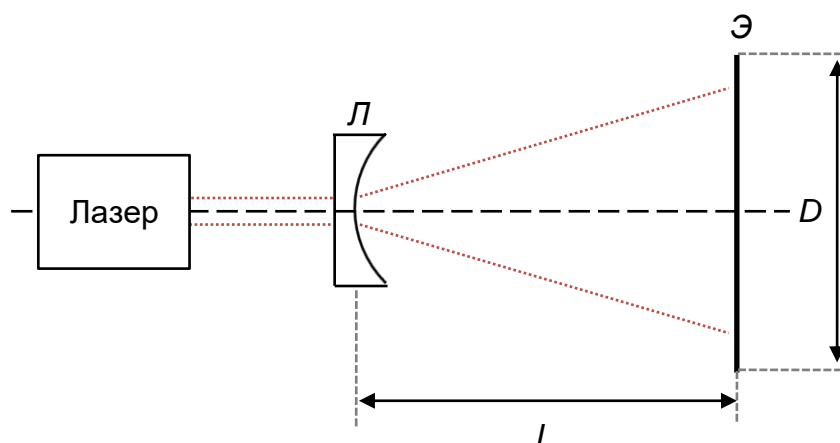


Рисунок 4.1 - Схема измерения рабочей моды лазера

4.3 Для определения рабочей моды лазера необходимо убрать экран, установить фотоприемник и измерить фототок  $I_{\phi}$ , перемещая с шагом 1 мм фотоприемник в пределах светового поля.

4.4 Результаты измерений занести в таблицу 4.1 и построить график пространственного распределения рабочей моды лазера.

Таблица 4.1 – Результаты измерений фототока  $I_{\phi}$  в пределах светового поля

Номер точки	1	2	...	N
Расстояние, мм	0	1	...	N
Фототок $I_{\phi}$ , мкА				

## 5. Измерение плоского угла расходимости лазерного луча $\theta$ .

Для измерения расходимости излучения чаще всего применяют следующие методы: метод сечений; метод регистрации диаграммы направленности.

Наиболее простым является метод двух сечений (рисунок 4.2). Если в дальней зоне измерить диаметры пучков  $d$  и  $D$  в двух поперечных сечениях, отстоящих друг от друга на расстоянии  $L$  то расходимость пучка можно определить из соотношения:

$$\theta = \arctg \frac{D - d}{2L} . \quad (4.1)$$

При малой расходимости и большом расстоянии  $L$  эта формула упрощается до вида:

$$\theta = \frac{d}{2L} . \quad (4.2)$$

### Порядок выполнения пункта 5

Измерения следует выполнять в следующей последовательности:

5.1 Установить экран перпендикулярно оси пучка на расстоянии  $L_1$  от выходного отверстия лазера (рисунок 4.2).

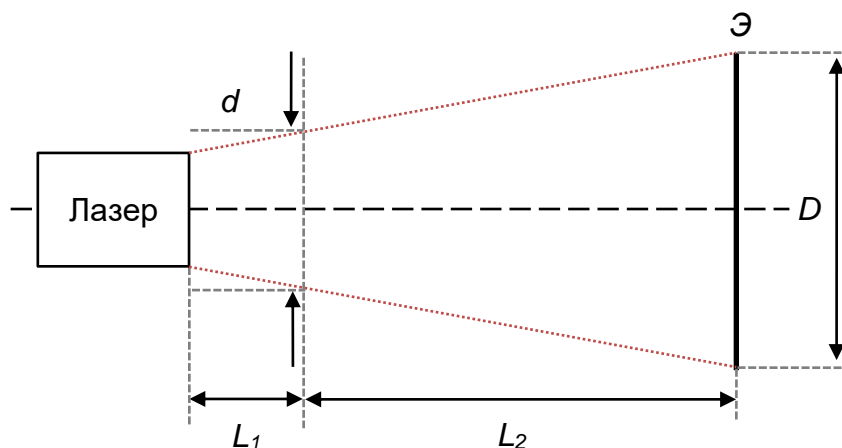


Рисунок 4.2 - Схема измерения угла расходимости луча лазера

5.2 Измерить диаметр  $d$  луча лазера, работающего в одномодовом режиме. Диаметр сечения луча  $d$  на экране измеряется с помощью обычной линейки. Если диаметр луча на экране имеет не круглое сечение, то следует измерять размеры пятна в вертикальном и горизонтальном направлениях.

5.3 Установить экран перпендикулярно оси пучка на расстоянии  $L_2$ .

5.4 Измерить диаметр  $D$  луча лазера. При этом диаметр светового пятна определяется по формуле:

$$D = \frac{D_{\text{гор}} + D_{\text{вер}}}{2} . \quad (4.3)$$

5.5 Рассчитать в угловых минутах величину плоского угла расходимости  $\theta$  лазерного луча, используя формулу 4.1.

Для снижения яркости пятна на экране следует при измерениях ослаблять луч лазера фильтром.

## 6. Измерение длины волны излучения лазера.

Для измерения длины волны излучения лазера используется дифракционная решетка (ДР). ДР представляет собой прозрачную пластинку, на которую нанесены линии шириной  $a$  через равные промежутки шириной  $b$ . Величина  $d$ , равная сумме  $a$  и  $b$ , называется периодом дифракционной решетки:  $d = a + b$ .

В результате интерференции когерентных волн, прошедших через все щели дифракционной решетки, на экране, расположенном за дифракционной решеткой, наблюдается дифракционная картина, которая представляет собой набор дифракционных максимумов разной интенсивности. Схема измерения приведена на рисунке 4.3.

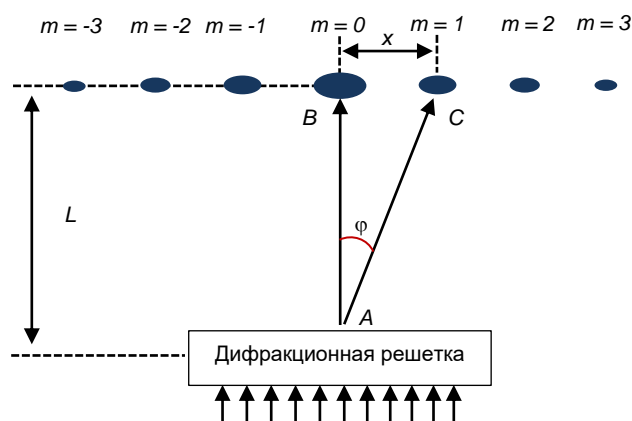


Рисунок 4.3 – Схема измерения длины волны излучения лазера

Формула, которая связывает период решетки  $d$ , длину волны света  $\lambda$ , порядок максимумов  $m = \pm 0, 1, 2$  и угол  $\varphi$ , под которым наблюдаются максимумы дифракционной картины имеет вид:

$$d \cdot \sin\varphi = m\lambda. \quad (4.4)$$

Из формулы получим уравнение для определения длины волны лазерного излучения:

$$\lambda = \frac{d \cdot \sin\varphi}{m}. \quad (4.5)$$

Величины порядка максимума  $m$  и угла  $\varphi$  определяют экспериментально. Для **малых углов** величина  $\sin \varphi$  может быть найдена по формуле:

$$\sin\varphi \approx \operatorname{tg}\varphi = \frac{x}{L}, \quad (4.6)$$

где  $x$  – расстояние от нулевого до первого максимума дифракционной картины,  $L$  – расстояние от экрана до дифракционной решетки.

Однако, для наибольшей точности угол отклонения  $\varphi$  дифракционных максимумов необходимо определять по формуле:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{x}{L}. \quad (4.7)$$

### Порядок выполнения пункта 6

6.1 Установить экран на таком расстоянии от дифракционной решетки, чтобы на нем получилось четкое изображение центральной полосы и спектров первого и второго порядков.

6.2 Измерить расстояние  $L$  от экрана до дифракционной решетки.

6.3 На экране измерить (линейкой) расстояние  $x_m$  между центрами максимумов 0-го и  $m$ -го порядка. Количество дифракционных максимумов с каждой стороны от центрального должно быть не менее 5.

6.4 Значения  $L$  и  $x_m$  использовать при расчете в формуле 4.7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты определения длины волны

Порядок дифракции $m$	Расстояние между серединами полос $x$ , см	Расстояние до экрана $L$ , см	Длина волны $\lambda$ , мкм
1			
2			
...			
Среднее значение			

6.5 Измерения необходимо провести не менее трех раз, при разных расстояниях  $L$ . Результаты представить в виде среднего арифметического значения для всех приведенных измерений. На основании полученных данных вычислить среднее значение длины волны излучения лазера.

### 7. Определение поляризации излучения лазера

Поляризационный характер излучения лазера измеряют, устанавливая на пути луча вращаемый поляризатор. В данном пункте измеряют график зависимости интенсивности прошедшего излучения от угла поворота поляризатора. Схема для исследования поляризации излучения лазера приведена на рисунке 4.2.

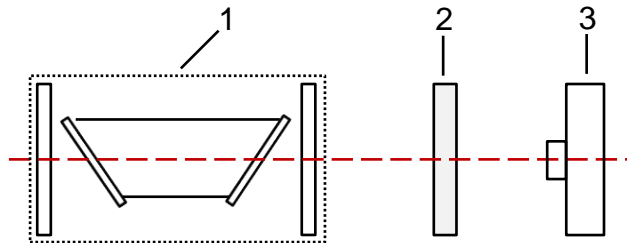


Рисунок 4.3 – Схема для исследования поляризации излучения лазера. 1 – лазер; 2 – поляризатор; 3 – фотоприемник

### Порядок выполнения пункта 7

7.1 Вращайте поляризатор вокруг оси до момента, когда ток  $I$  через фотодиод достигает наибольшей величины.

7.2 Снимите показания тока через каждые  $10-15^\circ$  поворота поляризатора. Отсчеты брать от  $0$  до  $360^\circ$ .

7.3 На основании экспериментальных данных построить график зависимости ток  $I$  от угла поворота поляроида  $\theta$ .

7.4 Зависимость вида  $I(\theta) = I_0 \cos^2\theta$  указывает на то, что излучение поляризовано линейно.

7.5 Построить теоретическую и экспериментальную зависимости  $I(\theta)$ , сравнить их и определить положение вектора  $\vec{E}$  в пространстве. Считать, что координата  $x$  соответствует горизонтальной оси, координата  $y$  соответствует вертикальной оси, а координата  $z$  соответствует оси распространения лазерного излучения.

## 5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать следующие пункты:

- Цель работы.
- Теоретические сведения.
- Описание установки.
- Ход работы.
- Результаты проделанной работы и выводы.

Требования к оформлению отчета приведены в образовательном стандарте вуза ОС ТУСУР 01-2021 [3].

После оформления отчет сдать на проверку преподавателю и приступить к защите работы. Перед защитой необходимо повторно изучить рекомендуемую литературу.

## 6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните принцип работы гелий-неонового лазера.
2. Зачем нужна высокая точность юстировки зеркал?
3. Что такое поляризация? Перечислите ее виды. В какой плоскости поляризовано излучение лазера и как можно определить плоскость поляризации?
4. Какова длина волны излучения лазера  $\lambda$ ?
5. От чего зависит угловая расходимость излучения лазера?
6. Каким образом можно измерить длину волны излучения гелий-неонового лазера?
7. Что такое мода оптического резонатора? Чем она определяется?

## Список литературы

1. Шандаров, В. М. Основы физической и квантовой оптики: Учебное пособие [Электронный ресурс] / В. М. Шандаров. – Томск: ТУСУР, 2012. – 197 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/750> (дата обращения: 10.02.2025)
2. Пихтин А. Н. Квантовая и оптическая электроника: учеб. для вузов / А. Н. Пихтин. – М.: Абрис, 2012. – 656 с.
3. Образовательный стандарт вуза ОС ТУСУР 01-2021. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления от 25.11.2021 [Электронный ресурс]. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2021. – 52 с. – Режим доступа: <https://regulations.tusur.ru/#/documents/87> (дата обращения: 10.02.2025)