

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ
ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ**

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 пространственной когерентности излучения газовых лазеров: 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. – 18 с.

В методических указаниях изложены основы теории когерентности света, описание устройства газового He-Ne-лазера. Описана экспериментальная установка и методика проведения лабораторной работы. В ходе выполнения работы студенты закрепляют теоретические знания об устройстве газовых и когерентности лазерного излучения.

Методические указания предназначены для студентов технических направлений подготовки и специальностей.

Одобрено на заседании каф. СВЧКР 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 Когерентность излучения.....	6
2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	11
3 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ	13
4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	14
5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	16
6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	17
Список литературы	18

Введение

Одним из самых замечательных свойств лазеров является высокая когерентность их излучения. Под когерентностью понимают согласованное протекание в пространстве и во времени нескольких колебательных или волновых процессов. Когерентность разделяют на **пространственную** и **временную**.

Пространственная когерентность – это согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов в разных точках пространства в один и тот же момент времени.

Временная когерентность – это согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов в разные моменты времени в одной и той же точке пространства.

Целью данной работы является ознакомление с конструкцией газового He-Ne-лазера, с основными понятиями когерентности оптических полей, а также изучение методов измерения характеристик когерентности излучения газовых лазеров.

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.

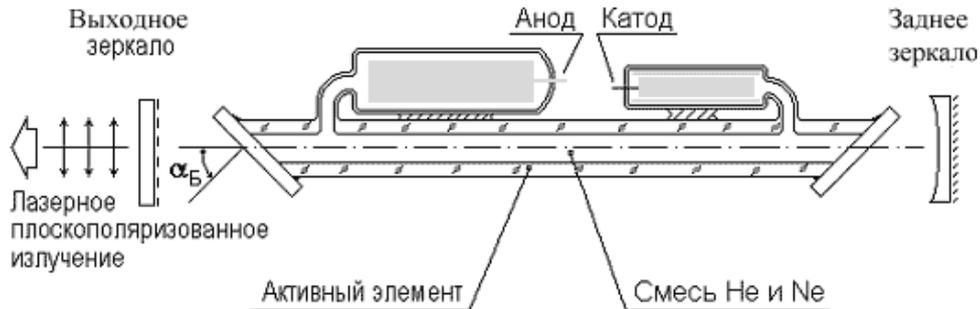


Рисунок 1.1 – Устройство гелий-неонового лазера

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).

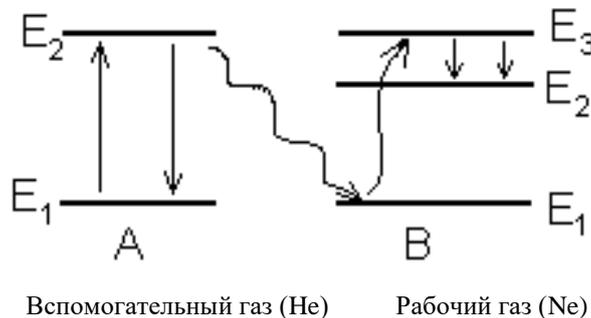


Рисунок 1.2 – Энергетические уровни смеси двух газов

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.

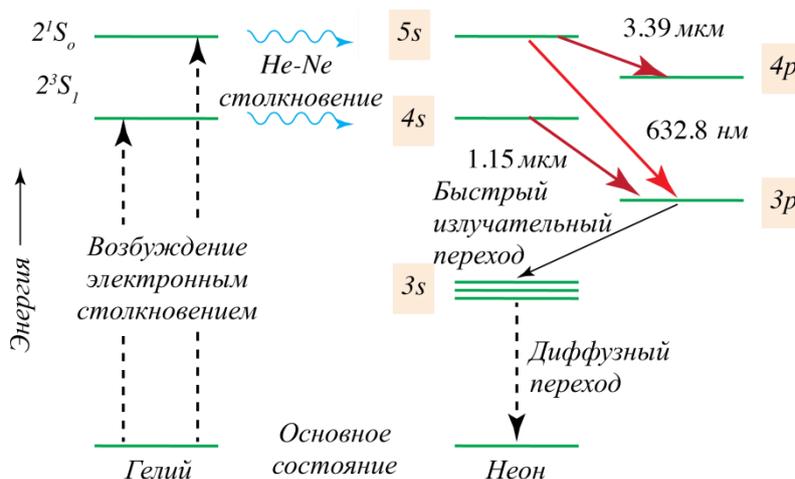


Рисунок 1.3 – Энергетическая диаграмма атомов He и Ne

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 $\lambda=3,39$ мкм), $2S - 2P$ (инфракрасное излучение $\lambda=1,15$ мкм) и $3S - 2P$ (красный свет $\lambda=0,63$ мкм).

При наличии в Ne состояния с инверсией населенностей и создания с помощью зеркал резонатора положительной обратной связи, генератор самовозбуждается и излучает на длине волны $\lambda=0,63$ мкм, $1,15$ мкм или $3,39$ мкм 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 Когерентность излучения

Представление об оптической когерентности обычно связывают с интерференцией. Это объясняется тем, что интерференция является простейшим явлением, в котором обнаруживается согласованность (корреляция) между световыми

пучками, вызывающая пространственно-неоднородное распределение интенсивности в области их пересечения. В результате возникают зоны взаимного усиления или ослабления света. Внешне интерференция проявляется в формировании интерференционной картины.

Явление пространственной когерентности излучения демонстрируется с помощью классического опыта с интерферометром Юнга (рисунок 1.4).

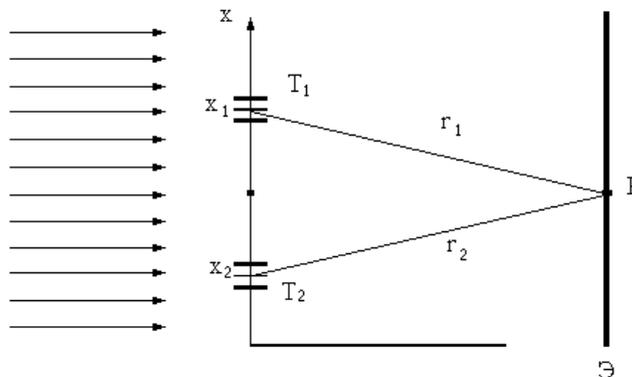


Рисунок 1.4 – Интерферометр Юнга

Пучок света падает на непрозрачный экран с двумя отверстиями T_1 и T_2 . Свет, прошедший через отверстия складывается на экране Э. Рассмотрим распределение света на этом экране. Если поле на отверстиях можно записать в виде

$$E_1(x_1, t) = E_1(x_1, t)e^{i[\omega t + \phi_1(x_1, t)]}$$

$$E_2(x_2, t) = E_2(x_2, t)e^{i[\omega t + \phi_2(x_2, t)]}, \quad (1.1)$$

то средняя за время T интенсивность света в точке P экрана будет пропорциональна:

$$I(x_1, x_2, r_1 - r_2) \approx |E_1[x_1, (t - r_1 / c)] + E_2[x_2, (t - r_2 / c)]|^2 =$$

$$= I_1 + I_2 + 2 \operatorname{Re} \frac{1}{T} \int_0^T E_1(x_1, t) E_2^*[x_2, (t - \frac{r_2 - r_1}{c})] dt, \quad (1.2)$$

где I_1 и I_2 интенсивности света в точке P , создаваемые только первым и только вторым отверстием, а третий член характеризует корреляцию полей от первого и второго отверстий. В (1.2) x_1 и x_2 – координаты отверстий, а $r_2 - r_1$ – разность хода волн до точки P .

Если амплитуда и фаза полей случайны во времени, то при усреднении третий член (1.2) обращается в нуль и интенсивность поля в точке P определяется, как сумма интенсивностей от обоих отверстий. Однако, если излучение из отверстий приходит согласованно, то корреляционный член отличен от нуля и интенсивность поля зависит от фазовых соотношений между двумя сигналами. Корреляционную функцию

$$\Gamma_{12}(x_1, x_2, r_2 - r_1) = \operatorname{Re} \frac{1}{T} \int_0^T E_1(x_1, t) E_2^*[x_2, (t - \frac{r_2 - r_1}{c})] dt \quad (1.3)$$

называют функцией частичной когерентности колебаний в точках x_1 и x_2 . Нормированная функция Γ_{12} определяет степень когерентности взаимодействующих световых волн:

$$\gamma_{12}(x_1, x_2, r_2 - r_1) = \frac{\Gamma_{12}(x_1, x_2, r_2 - r_1)}{\sqrt{I_1 I_2}}. \quad (1.4)$$

Теперь выражение (1.2) можно записать в виде:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \gamma_{12} \quad (1.5)$$

Из (1.1) и (1.2) видно, что степень когерентности представляет собой коэффициент корреляции колебаний $E_1(x_1, t)$ и $E_2(x_2, t)$. Если колебания в точках x_1 и x_2 полностью коррелированы (когерентны), то

$$|\gamma_{12}| = I. \quad (1.6)$$

Если колебания в точках x_1 и x_2 полностью некоррелированы, то

$$|\gamma_{12}| = 0. \quad (1.7)$$

Для полностью когерентного поля во всех точках

$$|\gamma_{12}| = I. \quad (1.8)$$

Для полностью некогерентного поля

$$|\gamma_{12}| = 0. \quad (1.9)$$

В промежуточном случае поле называется частично когерентным. Вообще говоря, любые поля, с которыми мы встречаемся в природе, частично когерентны.

Как следует из определения, величины Γ_{12} и γ_{12} зависят от трех аргументов: положения точек x_1 и x_2 и разности хода волн $r_1 - r_2$. Так как фазовый множитель при распределении поля равен e^{-jkr} , то зависимость Γ_{12} от $r_1 - r_2$ будет иметь вид:

$$\Gamma_{12}(x_1, x_2, r_2 - r_1) = \Gamma(x_1, x_2, r_2 - r_2) e^{ik(r_2 - r_1)} \quad (1.10)$$

Запишем $\Gamma_{12}(x_1, x_2, 0)$ в комплексной форме:

$$\Gamma_{12}(x_1, x_2, 0) = |\Gamma_{12}(x_1, x_2, 0)| e^{i\alpha} \quad (1.11)$$

где α – фаза Γ_{12} .

Тогда:

$$\Gamma_{12}(x_1, x_2, r_2 - r_1) = |\Gamma_{12}(x_1, x_2)| e^{i[\alpha + k(r_2 - r_1)]}. \quad (1.12)$$

Определив

$$|\gamma_{12}(x_1, x_2)| = \frac{|\Gamma_{12}(x_1, x_2)|}{\sqrt{I_1 I_2}}, \quad (1.13)$$

из формулы (1.5) получим:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(x_1, x_2)| \cos[\alpha + k(r_2 - r_1)] \quad (1.14)$$

Отсюда можно найти максимальное значение I_{\max} :

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(x_1, x_2)|, \quad (1.15)$$

и минимальное значение I_{\min} :

$$I_{\min} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(x_1, x_2)|. \quad (1.16)$$

Мерой контраста интерференционной картины является ее видность ν . Видность ν по определению равна:

$$\nu = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (1.17)$$

Подставляя в (1.17) I_{\max} и I_{\min} , получим:

$$\nu = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} |\gamma_{12}(x_1, x_2)|. \quad (1.18)$$

Как видно, видность интерференционной картины прямо пропорционально модулю степени когерентности γ_{12} . Если же $I_1 = I_2$, то

$$\nu = |\gamma_{12}|. \quad (1.18)$$

Таким образом, для того, чтобы измерить модуль степени пространственной когерентности поля в точках x_1 и x_2 достаточно измерить видность интерференционной картины, созданной интерферометром Юнга в плоскости экрана Э (рисунок 1.4).

Рассмотрим частный случай, когда интерферометр Юнга образован парой щелей шириной a каждая. Пусть центры щелей отстоят друг от друга на расстоянии r . Тогда можно показать, что распределение поля в дальней зоне описывается формулой, получаемой из (1.14):

$$I = (I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(x_1, x_2)| \cos[\alpha + \frac{2\pi r}{\lambda} \sin \theta]) \times \left[\frac{\sin(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta)}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta} \right]^2, \quad (1.19)$$

где I_1 и I_2 интенсивности излучения каждой из щелей; θ – угол между нормалью к плоскости интерферометра и направлением на точку наблюдения; λ – длина волны; x_1 и x_2 – координаты центров щелей, расстояние между которыми r .

Последний множитель в формуле (1.19) описывает диаграмму направленности отдельной щели.

Отметим, что поскольку $a \gg \lambda$ и $r \gg \lambda$ величину $\sin \theta$ можно полагать равной θ без существенной ошибки в вычислениях.

Измеряя видность интерференционной картины в дальней зоне и используя формулу (1.19), можно найти модуль степени когерентности $\gamma_{12}(x_1, x_2)$.

В дальнейшем вместо переменных x_1 и x_2 мы будем рассматривать степень когерентности, как функцию двух новых переменных: $r = |x_1 - x_2|$ и координаты центра интерферометра:

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2}. \quad (1.20)$$

В этом случае

$$\gamma_{12}(x_1, x_2) \equiv \gamma_{12}(r, x). \quad (1.21)$$

Степень пространственной когерентности лазерных пучков зависит от модового состава пучка. Если пучок образован только одной модой, то степень его когерентности практически не отличается от I . Если в пучке содержится большое число мод, то степень когерентности оказывается малой и тем меньшей, чем больше мод принимает участие в генерации лазера. Кроме того, степень когерентности, как видно из (1.21) зависит от расстояния r между щелями и от положения центра интерферометра x на сечении пучка.

Зависимость модуля степени когерентности γ_{12} от параметра r очевидна. Зависимость модуля степени когерентности γ_{12} от параметра x связана с тем, что модовый состав излучения меняется по сечению пучка. Например, если резонатор лазера сферический, то “объем” поля мод равного порядка существенно разный: чем выше номер моды, тем больше его поперечные размеры. Поэтому, при смещении интерферометра по сечению пучка, в центре его степень когерентности будет мала, поскольку в этой области суммируются поля всех мод. На периферии пучка присутствуют только поля высокого порядка и степень когерентности будет более высокой. В плоскопараллельном резонаторе все моды имеют один и тот же объем и этот эффект будет выражен гораздо слабее.

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Источником светового излучения в экспериментальной установке является газовый He-Ne лазер, работающий в одномодовом режиме (рисунок 2.1). Луч лазера после прохождения через делительную пластину 8 падает на интерферометр Юнга 2, выполненный в виде двух щелей, шириной 100 мкм каждая. Расстояние между щелями меняется от 100 мкм до 1000 мкм. После прохождения через интерферометр лучи проходят через сферическую линзу 3 и короткофокусную рассеивающую цилиндрическую линзу 4. Расстояние между линзами подбирается так, что в плоскости экрана 5 распределение поля на интерферометре Юнга соответствует распределению поля в дальней зоне. Одновременно через делительную пластину 8, линзу 9 и призму 10 пятно лазера попадает на экран. С помощью этого канала можно контролировать форму пятна излучения и модовый состав лазерного пучка.

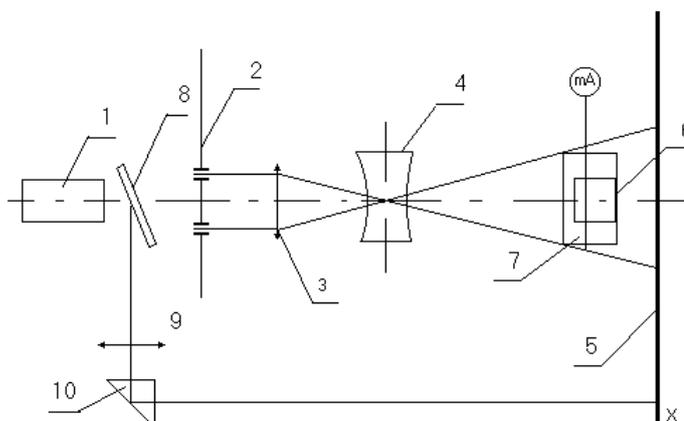


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки для измерения когерентности лазерного излучения

Интерферометр Юнга, линзы 3 и 4, а также фотодиод 6 расположены на подвижных столиках, что позволяет осуществить настройку схемы и снять искомые зависимости. Фототок с фотодиода измеряется цифровым вольтметром.

Зависимость интенсивности излучения от координаты x в плоскости экрана 5 описывается выражением (1.5). Проведем анализ (1.5), пренебрегая смещением интерференционной картины, связанной с аргументом функции γ_{12} .

Тогда из (1.5) следует, что в центре картины при $\theta = 0$ будет наблюдаться максимум:

$$I_0 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(r, x)|. \quad (2.1)$$

В точке $\frac{2\pi r}{\lambda} \theta_m = \pi$ будет минимум, равный

$$I_{\min 1} = (I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(r, x)|) \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi a}{2r}\right)}{\frac{\pi a}{2r}} \right), \quad (2.2)$$

где a – размер щели интерферометра, r – расстояние между щелями.

Далее, вблизи точки $\theta = 2 \cdot \theta_m$ будет расположен второй максимум интерференционной картины:

$$I_{\max 1} = (I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(r, x)|) \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi a}{r}\right)}{\frac{\pi a}{r}} \right)^2, \quad (2.3)$$

а в точке $\theta = 3 \cdot \theta_m$ второй минимум и т.д. Сравнивая выражения для $I_{\max 1}$ и I_0 , получим:

$$I_{\max 1} \approx 0,41 I_0, \quad (2.4)$$

Вследствие малого расстояния между щелями будем полагать $I_1 = I_2$. Тогда из (2.1), (2.2) получим:

$$|\gamma_{12}(r, x)| = \frac{1 - \frac{I_{\min}}{\rho I_{\max}}}{1 + \frac{I_{\min}}{\rho I_{\max}}}, \quad (2.5)$$

где

$$\rho = \left(\frac{\sin t}{t} \right)^2, \quad t = \frac{\pi a}{2r}. \quad (2.6)$$

Таким образом, из вышеизложенного следует, что для определения степени пространственной когерентности необходимо выделить излучение в двух точках сечения светового луча, измерить интенсивность излучения в максимумах и минимумах интерференционной картины и используя формулу (2.5) найти модуль степени когерентности.

3 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

- 3.1 Измерение пространственного распределения интенсивности светового поля с помощью фотоприемника на расстоянии L от линзы.
- 3.2 Определение рабочей моды лазера.
- 3.3 Измерение интенсивности максимумов излучения интерференционной картины в зависимости от пространственной координаты.
- 3.4 Определение видности интерференционной картины.
- 3.5 Исследование зависимости степени когерентности от базы интерферометра.

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. Включить лазер. Для этого нажать на блоке питания кнопку «ВКЛ». После 3-5 минутного прогрева появится генерация.

2. Убедиться в наличии генерации. В случае неисправной работы устройства сообщить преподавателю!

3. Проверить в каком режиме работает лазер. Для этого поставить сферическую линзу за лазером и в режиме генерации основной моды ТЕМ₀₀ на экране наблюдается одно пятно.

4. С помощью микрометрического винта столика, на котором расположен интерферометр Юнга 2 (рисунок 2.2), совместить центр интерферометра №1 с центром лазерного луча. Получить интерференционную картину.

5. Измерить интенсивности максимумов излучения интерференционной картины в зависимости от координаты x в плоскости экрана 5

6. Результаты измерений занести в таблицу 4.1 . Измерения повторить не менее 3-х раз.

Таблица 4.1 – База интерферометра №1 - 100 мкм

№ измер	1	2	3	4	средн.	$\frac{I_{\max 1,2}}{I_0} \approx \beta$
$I_{\max 1}$						
$I_{\min 1}$						
I_0						
$I_{\min 2}$						
$I_{\max 2}$						

где $I_{\max 1,2}$ $I_{\min 1,2}$ – интенсивности излучения в максимумах и минимумах интерференционной картины.

7. По измеренным данным в таблице 4.1 определить $\beta_{1,2}$. Результаты измерений $I_{\max 1}$ и $I_{\min 1}$ или $I_{\max 2}$ и $I_{\min 2}$ занести в таблицу 4.2 и определить видность интерференционной картины интерферометра №1.

Таблица 4.2 – Результаты измерения I_{\max} и I_{\min}

№ изм	1	2	3	4	γ_{12}
I_{\max}					
I_{\min}					

8. Измерить зависимость степени когерентности от базы интерферометра не

менее чем для 5 баз. Для этого повторите измерения $I_{\max 1}$ и $I_{\min 1}$ или $I_{\max 2}$ и $I_{\min 2}$, для интерферометров № 2, 3, 4, 5 смещая их, с помощью микрометрического винта, относительно луча лазера. Результаты измерений занесите в таблицу 4.3. При установке каждой базы центр интерферометра совмещать с центром луча.

Таблица 4.3 – Результаты измерения зависимости степени когерентности

r	200мк	300мк	400мк	500мк	600мк	700мк
I_{\max}						
I_{\min}						
γ_{12}						

9. По результатам вычислений построить график $\gamma_{12} = f(r)$.

10. Обработку результатов по пп. 2 и 3 провести с помощью формулы (2.6).
Результаты изобразить графически.

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. Что характеризует временная когерентность лазера?
2. Что характеризует пространственная когерентность излучения лазера?
3. С помощью какого прибора можно измерить пространственную когерентность?
4. Что такое видность интерференционной картины?
5. Что такое степень пространственной когерентности? Как ее измерить?
6. Какие свойства лазерного излучения определяет степень пространственной когерентности? От чего она зависит?
7. Что такое мода оптического резонатора?
8. Как будет изменяться степень когерентности, если увеличивать базу интерферометра Юнга?

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)