Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники

А.Д. Безпалый, А.Е. Мандель

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО YAG:Nd–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. Безпалый, А. Е. Мандель

Безпалый, Александр Дмитриевич
Б-39 Исследование основных параметров твердотельного YAG:Nd-лазера: методические указания к лабораторной работе для студентов технических направлений подготовки и специальностей / А.Д. Безпалый, А.Е. Мандель. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025. – 17 с.

В методических указаниях изложены принципы работы и устройство твердотельного YAG:Nd-лазера. Описана экспериментальная установка и методика проведения лабораторной работы. В ходе выполнения работы студенты закрепляют теоретические знания об устройстве твердотельных лазеров и их основных параметрах: модового состава, выходной мощности, угловой расходимости и длины волны излучения лазера.

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

© Безпалый А. Д., Мандель А. Е., 2025
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 4
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ 5
1.1 Устройство и принцип действия твердотельного лазера на YAG:Nd^{3+} 5
1.2 Типы колебаний, расходимость 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

Активная среда твердотельных лазеров содержит активные ионы примеси в твердотельной матрице. Именно в ионах примесей и создается инверсная населенность. В качестве примесных ионов могут быть использованы ионы переходных металлов (марганец (Mn), хром (Cr), никель (Ni), кобальт (Co)) или редкоземельных элементов (неодим (Nd), европий (Eu), самарий (Sm)). Однако в лазерах промышленного назначения используются лишь Cr и Nd.

В качестве матриц твердотельных активных сред используются такие кристаллические или аморфные диэлектрические материалы, как корунд (Al_2O_3), иттрий-алюминиевый гранат ($Y_3Al_5O_{12}$) или стекло. Оптимальная концентрация примесных ионов в матрице, как правило, невелика и составляет 0,05-10%. Уменьшение концентрации приводит к спаду коэффициента усиления, а увеличение – к взаимодействию активных частиц между собой.

Рабочий активный элемент технологического лазера должен удовлетворять большому числу зачастую противоречивых требований. Он должен обеспечивать большой коэффициент усиления, быть оптически однородным, механически прочным; термостойким, технологичным, прозрачным для излучения накачки, а также допускать механическую и оптическую обработку, допускать изготовление образцов больших размеров и иметь высокую теплопроводность.

В настоящее время существует большое количество твердотельных лазеров, как импульсных, так и непрерывных. Твердотельные лазеры работают на искусственно выращенных кристаллах рубина, алюмо-иттриевого граната и на стекле с примесью редкоземельного элемента Nd. Накачка твердотельных лазеров, как правило, оптическая.

Целью данной работы является ознакомление с конструкцией твердотельного YAG:Nd-лазера и исследование его основных параметров: структуры поля лазерного излучения, длины волны и угловой расходимости.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Устройство и принцип действия твердотельного лазера на YAG:Nd^{3+}

Неодимовые лазеры являются самыми популярными из твердотельных лазеров. В этих лазерах активной средой обычно является кристалл $Y_3A_{I5}O_{12}$ (иттрий-алюминиевый гранат), в котором часть ионов Y^{3+} замещена ионами Nd^{3+}. Типичная атомарная концентрация неодима составляет 0,05-1,3 %.

Упрощенная схема энергетических уровней кристалла YAG:Nd^{3+} приведена на рисунке 1.1.

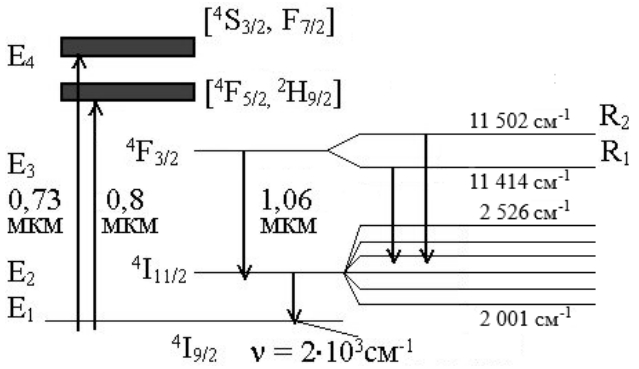

Рисунок 1.1 – Схема энергетических уровней кристалла YAG:Nd^{3+}

Две основные полосы накачки расположены на длинах волн 0,73 и 0,8 мкм, соответственно. В кристалле YAG:Nd^{3+} переход $^4F_{3/2}$ – $^4I_{11/2}$ хорошо подходит для получения лазерной генерации в четырехуровневой схеме. Этот переход имеет длину волны λ= 1,064 мкм (ближний ИК диапазон).

YAG:Nd-лазеры могут работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Активные элементы выполняются в виде стержней диаметром до 0,5-1 см и длиной до 10 см. Они отличаются высоким оптическим качеством и хорошо поддаются полировке. Обычно лазеры на иттрий-алюминиевом гранате (ИАГ) используются в режиме импульсно-периодического или непрерывного возбуждения. При этом в режиме импульсно-периодического возбуждения создают достаточно длинные (0,5-10 мс) импульсы с частотой повторения до 100 Гц. Мощность непрерывной генерации современных лазеров на ИАГ достигает 400 Вт.

Оптическая накачка YAG:Nd-лазеров осуществляется либо с помощью излучения газоразрядных ламп, либо с помощью светодиодов или лазерных диодов.

YAG:Nd-лазеры могут работать в непрерывном и импульсном режиме. В первом случае используются криптоновые лампы накачки, во втором — ксеноновые. И основная проблема в обоих случаях – низкая эффективность поглощения излучения накачки. Это приводит к высокому энергопотреблению и большому тепловыделению. Так что для подобных систем требуется водяное охлаждение.

Вторым существенным недостатком твердотельных лазеров с ламповой накачкой является непродолжительный срок службы ламп – несколько сотен часов. А их регулярная замена ведет к существенному увеличению эксплуатационных расходов.

Тем не менее, твердотельные лазеры с ламповой накачкой имеют и ряд преимуществ: большая энергия импульса, высокое качество излучения, возможность получения пятна обработки меньшего размера, лучшее поглощение металлами и надежность.

Другой способ оптической накачки YAG:Nd-лазера – накачка лазерными диодами или линейками лазерных диодов с длиной волны излучения 808 нм, идеально

попадающей в полосу поглощения активной среды YAG:Nd-лазера. Типичная конструкция лазера с диодной накачкой, генерирующего излучение с длиной волны 1064 нм, представлена схематически на рисунке 1.2.

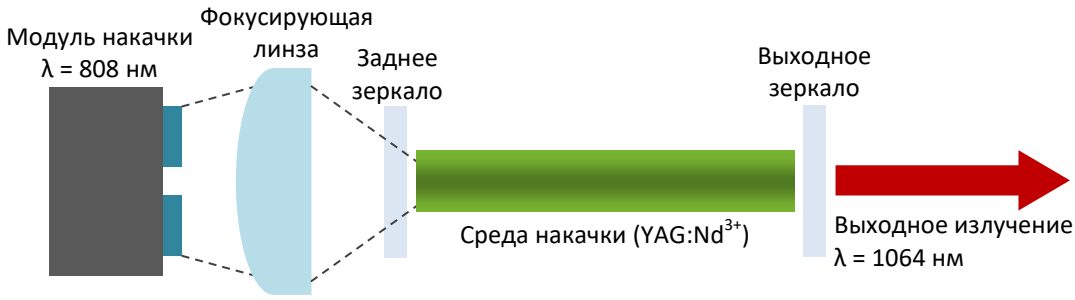

Рисунок 1.2 – Схема YAG:Nd-лазера с диодной накачкой:
ЛД – лазерный диод; ФО – фокусирующая оптическая система; З – входное и выходное зеркала;
$YAG:Nd^{3+}$ – накачиваемый кристалл ИАГ

Излучение лазерного диода с длиной волны λ = 808 нм вводится через торец в активный кристалл с помощью фокусирующей оптической системы. Заднее зеркало резонатора прозрачно для излучения накачки, но обладает высоким коэффициентом отражения для излучения с длиной волны 1064 нм. Выходное зеркало резонатора является частично прозрачным для излучения с λ = 1064 мкм.

Основными характеристиками YAG:Nd-лазера с диодной накачкой является высокий КПД и возможность генерации импульсов с периодичностью 0,1…100 кГц . Более эффективное поглощение излучения накачки позволяет существенно снизить энергопотребление лазера. Кроме того, меньше энергии уходит в тепловые потери, поэтому лазерам с диодной накачкой достаточно воздушного охлаждения. Это упрощает эксплуатацию и позволяет уменьшить габариты. Еще одним преимуществом таких лазеров является большой срок службы лазерных диодов. Он составляет более 10000 часов. К недостаткам лазеров с диодной накачкой можно отнести чувствительность к температуре окружающей среды в жаркое время.

1.2 Типы колебаний, расходимость

Поглощение и усиление поля в лазере возможно не на одной частоте, а в некоторой полосе частот. Контур линии поглощения (усиления) твердотельного YAG:Nd -лазера имеет вид Лоренцевой кривой (рисунок 1.3). Твердотельные лазеры генерируют одновременно большое количество продольных мод.

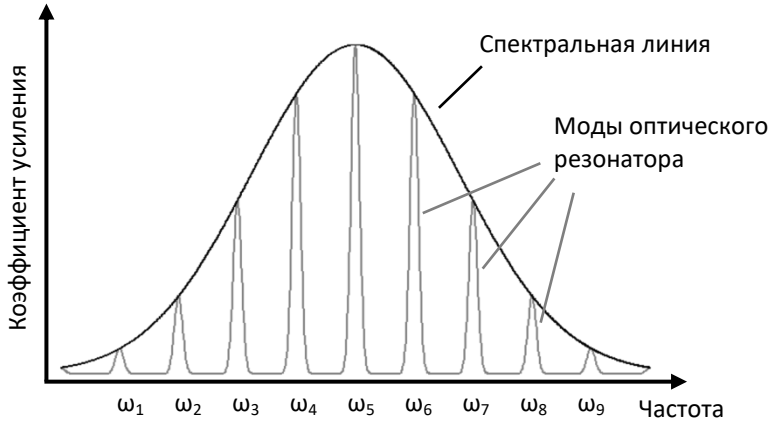

Рисунок 1.3 – Зависимость коэффициента усиления от частоты

Каждая мода характеризуется своим пространственным распределением. Различают два вида колебаний: аксиальные (продольные типы колебания), неаксиальные (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, укладывающихся вдоль оси резонатора от зеркала до зеркала. Индексы m и n указывают число вариантов поля укладывающихся 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

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

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 1.4.

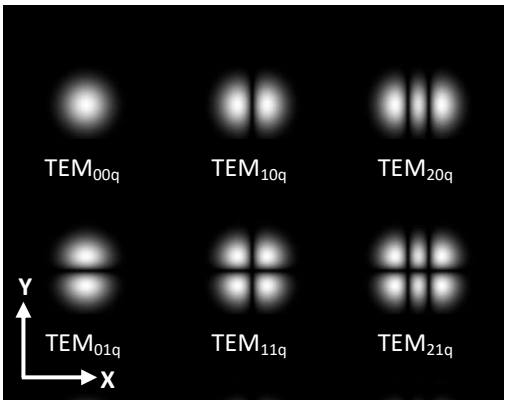

Рисунок 1.4 – Структура поля в поперечной плоскости

Моды $TEM_{\mathbf{00q}}$, как следует из рисунка 1.4, 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:

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

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

$$\Delta f = nf_0\,. \qquad (1.3)$$

В режиме свободного генерирования лазерного излучения, при котором добротность оптического резонатора не меняется, структура лазерного излучения носит пичковый характер (рисунок 1.5). Пичковая структура лазерного излучения в режиме свободной генерации обусловлена тем, что накачка и индуцированные излучательные переходы выступают как конкурирующие процессы.

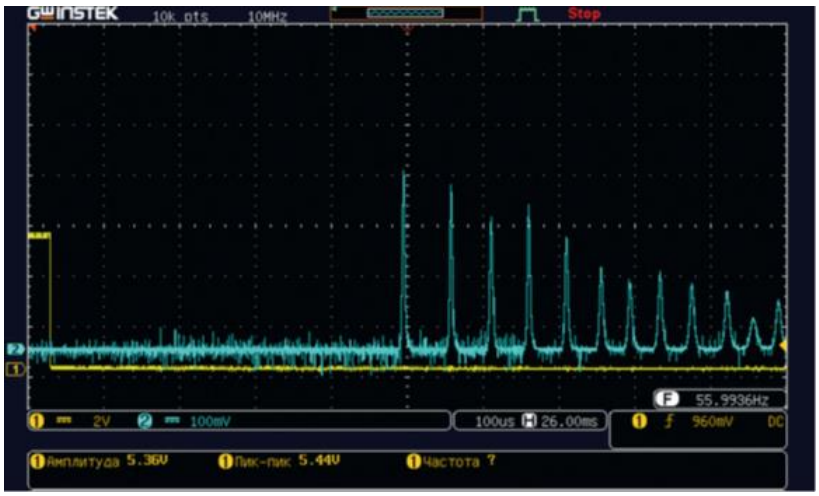

Рисунок 1.5 – Пичковый режим работы YAG:Nd-лазера

Важным параметром твердотельного 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 θ. Минимально достижимый угол расхождения пучка лазера ограничивается явлениями дифракции и вычисляется по формуле

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

где d – диаметр апертуры излучателя.

Твердотельные лазеры имеют угол расходимости пучка излучения больший по сравнению с газовыми лазерами, величина θ которых составляет порядка нескольких угловых минут.

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка для исследования параметров твердотельного лазера на кристалле YAG:Nd^{3+} приведена на рисунке 2.1.

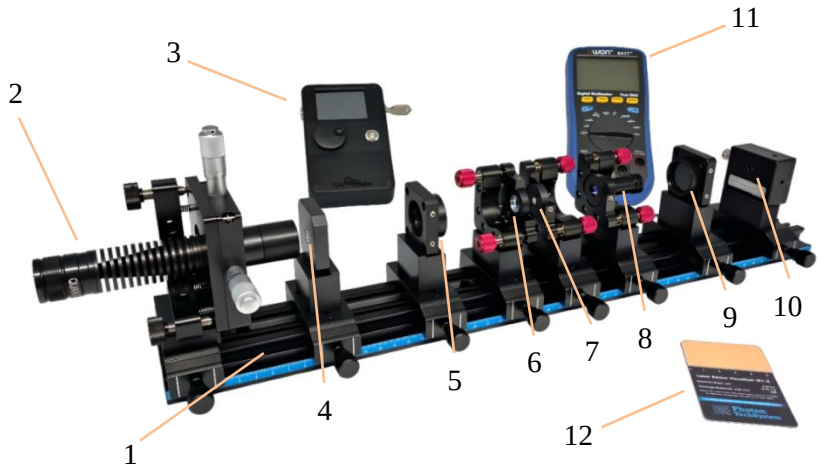

Рисунок 2.1 – Лабораторный стенд для исследования параметров твердотельного лазера на кристалле YAG:Nd^{3+}

В состав установки входят следующие основные элементы: 1 – диодный лазерный модуль накачки; 2 – терминал управления диодным лазерным модулем; 3 – оптический рельс; 4 – коллимирующая линза в держателе; 5 – фокусирующая линза в держателе; 6 – входное плоское зеркало; 7 – активный элемент из кристалла YAG:Nd^{3+}; 8 – выходное сферическое зеркало; 9 – оптический светофильтр; 10 – фотодетектор; 11 – диафрагма; 11 – мультиметр цифровой; 12 – визуализатор лазерного излучения.

Все элементы находятся в специальных держателях и размещаются на оптическом рельсе 1. Лазерный диод 2 используется для оптической накачки активного элемента 7 из кристалла $Y_3Al_5O_{12}$:Nd^{3+}. Управление модулем накачки осуществляется при помощи терминала 3. Линзы 4 и 5 необходимы для расширения и фокусировки излучения на активный элемент 7. Зеркала 6 и 8 образуют резонатор лазера. Лазер на $Y_3Al_5O_{12}$:Nd^{3+} генерирует излучение с длиной волны 1064 нм. Светофильтр 9 отсекает излучение с λ = 808 нм и пропускает генерируемое в $Y_3Al_5O_{12}$:Nd^{3+} излучение на основной гармонике (λ = 1064 нм). Фотодетектор 10 регистрирует излучение лазера, которое измеряется с помощью цифрового мультиметра Визуализатор лазерного излучения 12 необходим для обнаружения генерации лазерного излучения с λ = 1064 нм.

3 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

3.1 Исследовать модовый состав лазерного излучения.
3.2 Измерить зависимость тока фотодетектора $I_{ф}$, пропорционального выходной мощности лазерного излучения, от тока инжекции $I_{и}$ диодного лазера накачки.
3.3 Исследовать пичковый режим лазерной генерации.
3.4 Измерение угла расходимости θ лазерного луча.
3.5 Измерить длину волны λ излучения лазера

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 описанием экспериментальной установки и конструкцией лазера (рисунки 1.2 и 2.1).
2. Включить лазер.
3. Убедиться в наличии генерации. В случае неисправной работы устройства сообщить преподавателю!

4. Исследование модового состава лазерного излучения.

Вид поперечного распределения светового поля (модового состава) на выходном зеркале лазера завивист от взаимного расположения зеркал резонатора. В результате структура поля в поперечной плоскости может иметь от одного до нескольких максимумов (рисунок 1.4).

Порядок выполнения пункта 4.

4.1 Вращая винты кинематического держателя выходного зеркала исследуйте структуру поля в поперечной плоскости для простейших типов колебаний (модовый состав излучения лазера). Сфотографируйте изображение поля на визуализуторе.

4.2 Для дальнейшей работы настройте лазер в одномодовый режим генерации – режим работы лазера, при котором лазерное излучение содержит только продольные моды.

5. Измерение зависимости тока $I_ф$ от тока инжекции $I_и$.

Ток фотодетектора $I_ф$ пропорционален выходной мощности $P_{вых}$ лазерного излучения с $\lambda = 1064$ нм, а ток инжекции $I_и$ диодного лазера пропорционален мощности накачки $P_н$ активного элемента. Мощность $P_{вых}$ лазерного излучения, генерируемого в кристалле YAG:Nd^{3+}, зависит от мощности накачки $P_н$ активного элемента.

Порядок выполнения пункта 5.

5.1 С помощью визуализатора проверьте попадание излучения в активную область фотодетектора 10.

5.2 Для измерения тока $I_ф$ фотодетектора подключите его к мультиметру 11.

5.3 Измерьте зависимость тока $I_ф$ от тока $I_и$. Ток накачки $I_и$ необходимо изменять в пределах от 150 до 800 мА. В диапазоне 150–250 мА используйте шаг 10 мА. Достигнув значения $I_и = 250$ мА, используйте шаг 50 мА.

Измерения повторите не менее трёх раз. Найдите среднее значение. Полученные результаты измерений занесите в таблицу 4.1.

Таблица4.1 – Результаты измерения зависимости тока $I_ф$ от тока инжекции $I_и$

I, мА	$I_{ф1}$, мА	$I_{ф2}$, мА	$I_{ф3}$, мА	$I_{ф\ ср}$, мА
150				
160				
….				
250				
300				
….				
800				

Постройте график зависимости тока фотоприемника $I_ф$ от тока инжекции $I_и$ диодного лазера накачки.

6. Исследование пичкового режима лазерной генерации.

В режиме свободного генерирования лазерного излучения, при котором добротность оптического резонатора не меняется, структура лазерного излучения носит пичковый характер (рисунок 1.5).

Порядок выполнения пункта 6.

6.1 Установите на терминале управления лазера накачки ток инжекции выше порогового значения на 50 мА (около 300 мА).

6.2 Подключите цифровой осциллограф к сети.

6.3 Соедините фотодетектор с каналом 1 осциллографа. Установите на осциллографе развёртку по времени 100 μс на одну клетку.

6.4 Включите диодный лазер накачки.

6.5 Получите на осциллографе пичковый режим работы лазера. Определите среднюю длительность пичков.

7. Измерение угла расходимости θ лазерного луча.

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

Наиболее простым является метод двух сечений (рисунок 4.1). 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:

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

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

$$\theta = \frac{d}{2L} \, . \tag{4.2}$$

Порядок выполнения пункта 7.

7.1 Установить экран (визуализатор) перпендикулярно оси пучка на расстоянии L_1 от светофильтра 9 (рисунок 4.1).

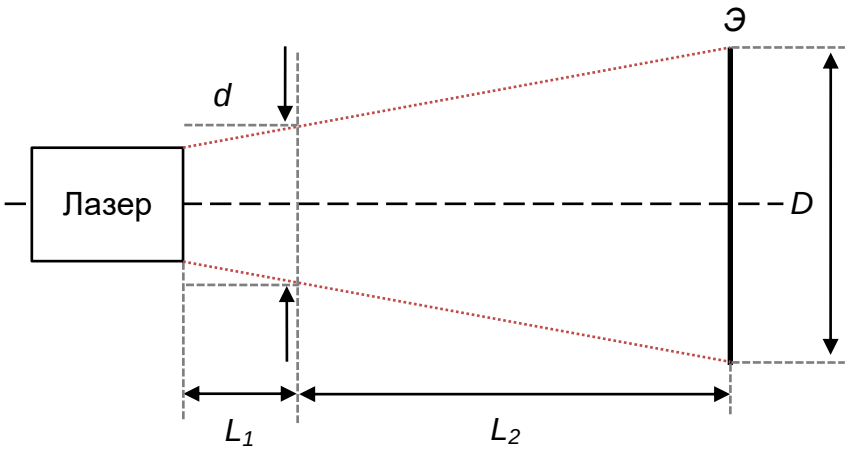

Рисунок 4.1 - Схема измерения угла расходимости луча лазера

7.2 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 (визуализаторе) имеет не круглое сечение, то следует измерять

размеры пятна в вертикальном и горизонтальном направлениях.

7.3 Установить экран перпендикулярно оси пучка на расстоянии L_2.

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

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

7.5 Рассчитать в угловых минутах величину плоского угла расходимости θ лазерного луча, используя формулу 4.1.

Для снижения яркости пятна на визуализаторе следует при измерениях ослаблять луч лазера, уменьшая ток инжекции $I_{\text{и}}$, либо использовать светофильтр.

8. 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 4.2.

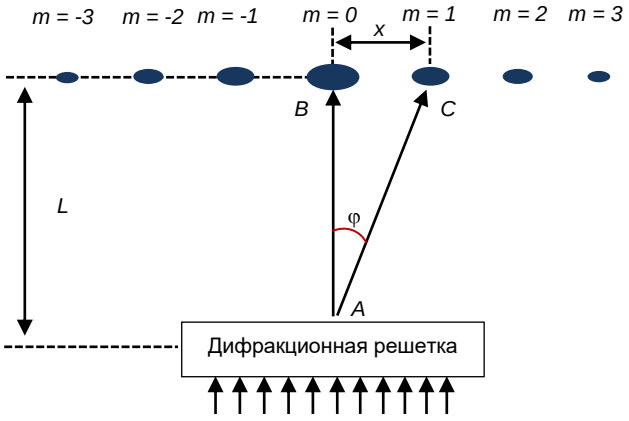

Рисунок 4.2 – Схема измерения длины волны излучения лазера

Формула, которая связывает период решетки d, длину волны света λ, порядок максимумов m = ±0, 1, 2 и угол φ, под которым наблюдаются максимумы дифракционной картины имеет вид:

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

Из формулы получим уравнение для определения длины волны лазерного излучения:

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

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

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

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

Однако, для наибольшей точности угол отклонения φ дифракционных

максимумов необходимо определять по формуле:

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

Порядок выполнения пункта 8.

8.1 Установить дифракционную решетку после светофильтра 9

8.2 Установить визуализатор на расстоянии L от дифракционной решетки, чтобы на нем получилось четкое изображение центральной и дифрагированных световых пучков (максимумы первого и более высоких порядков).

8.3 Измерить расстояние L от визуализатора до дифракционной решетки.

8.4 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.

8.5 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 λ, мкм
1			
2			
…			
Среднее значение			

8.6 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.

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. Как выглядит схема энергетических уровней кристалла YAG:Nd?
2. Зачем нужна высокая точность юстировки зеркал?
3. Что такое мода оптического резонатора? Чем она определяется?
4. Какие режимы работы могут быть у лазера на YAG:Nd?
5. Какие виды накачки лазера на YAG:Nd известны? Как влияет ток инжекции $I_{и}$ диодного лазера накачки на выходную мощность $P_{вых}$ лазера на YAG:Nd?
6. От чего зависит угловая расходимость излучения лазера?
7. Каким образом можно измерить длину волны излучения лазера на кристалле YAG:Nd? Какую длину волны λ основной гармоники излучает лазер на YAG:Nd?

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)