

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ЛАЗЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ



Ижевск 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»
Институт математики, информационных технологий и физики
Кафедра общей физики

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ЛАЗЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ**

Учебно-методическое пособие



Ижевск
2025

УДК 621.9.048.7(075.8)
ББК 30.618я73-5
Л125

Рекомендовано к изданию учебно-методическим советом УдГУ

Рецензенты: д-р х.ф.-м. наук, профессор каф. химии и химической технологии ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» **О.В. Канунникова**, д-р хим. наук, профессор каф. фундаментальной и прикладной химии ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет» **С.М. Решетников**.

Составители: Писарева Т.А., Смирнов И.В., Харанжевский Е.В.

Л125 Лабораторный практикум по лазерным технологиям : учеб.-метод. пособие / сост. Т.А. Писарева, И.В. Смирнов, Е.В. Харанжевский. – Ижевск : Удмуртский университет, 2025. – 71 с.

ISBN 978–5–4312–1270-3

В учебно-методическом пособии «Лабораторный практикум по лазерным технологиям» представлена информация к выполнению лабораторного практикума по лазерным технологиям и обработке материалов. Теоретические материалы посвящены описанию физических основ лазерных оптических генераторов, процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом, областей применения лазерных технологий и методов прогнозирования качества лазерной обработки.

Пособие предназначено для студентов естественно-научных направлений подготовки 04.03.02 Химия, физика и механика материалов, 04.04.02.01 Химия и физика материалов, осваивающих курс «Лазерные технологии», «Лазерные нанотехнологии».

УДК 621.9.048.7(075.8)
ББК 30.618я73-5

ISBN 978–5–4312–1270-3

© Писарева Т.А., Смирнов И.В.,
Харанжевский Е.В., сост., 2025
© ФГБОУ ВО «Удмуртский
государственный университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Памятка студенту	6
Лабораторная работа № 1	12
ИЗУЧЕНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ И РАБОТА С ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКОЙ БУЛАТ LRS–300AU ...	12
Лабораторная работа № 2	34
ИЗУЧЕНИЕ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА И РАБОТА С ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКОЙ LDesigner F1	34
Лабораторная работа № 3	56
ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ CO ₂ ЛАЗЕРА И РАБОТА С ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКОЙ LDesigner C1	56
Лабораторная работа №4	61
ПРИМЕНЕНИЕ УФ-ЛАЗЕРА ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ.....	61
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	70

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий лабораторный практикум по лазерным технологиям предназначен для студентов бакалавров физических направлений и направления «Химия, физика и механика материалов», изучающих современные методы обработки материалов с использованием лазерного излучения. Первые выдающиеся достижения в создании лазеров открыли новую и перспективную область технологических решений, широко используемых в науке и технике. Быстрое прогрессирующее развитие фундаментальной науки, посвященной физическим основам генерации лазерного излучения и лазерной техники, позволило расширить современные области использования лазеров и их возможностей. Широта задач, решаемых с применением лазерных технологий, объясняет большое разнообразие видов лазеров. Лазерные технологии прочно вошли в различные отрасли промышленности, включая машиностроение, микроэлектронику, медицину и другие, что обуславливает необходимость подготовки квалифицированных специалистов, владеющих теоретическими знаниями и практическими навыками в этой области.

Целью данного практикума является формирование у студентов комплексного понимания физических основ лазерных технологий, а также приобретение практических навыков работы с лазерным оборудованием и освоение методик проведения экспериментов. В процессе выполнения лабораторных работ студенты изучат принципы генерации лазерного излучения, его характеристики и взаимодействие с материалами.

Практикум охватывает широкий спектр лазерных технологий, таких как лазерная резка, сварка, маркировка, гравировка и поверхностная обработка. Каждая лабораторная работа содержит теоретическое введение, описание экспериментальной установки и методику проведения измерений.

Для закрепления полученных знаний предусмотрены задания, требования по оформлению результатов и представлению отчета.

Особенностью данного практикума является его ориентация на современные лазерные системы и технологии. В лабораторных работах используются промышленные лазерные установки, что позволяет студентам получить опыт работы с оборудованием, применяемым на реальных производствах.

Авторы надеются, что данный лабораторный практикум будет полезен студентам при изучении лазерных технологий и поможет им в дальнейшей профессиональной деятельности.

Памятка студенту

1. Перейдя в лабораторию студент обязательно проходит инструктаж по технике безопасности и расписывается в журнале по ТБ.

2. Лабораторная работа выполняется на листах формата А4 или в тетради, графики – на миллиметровой бумаге.

3. Студент допускается к выполнению работы после сдачи допуска к ней. В случае, если накоплено два допуска без сдачи отчетов, к сдаче следующего студент не допускается.

4. Допуск к работе считается сданным, если каждым студентом подготовлен отчет по лабораторной работе, студент может удовлетворительно ответить на вопросы преподавателя в рамках того объема теоретического материала, который необходим для понимания сути поставленных задач практикума и их выполнения, студент знает суть проводимых исследований, порядок их выполнения и особенности требований ТБ по данной работе физического практикума, знает в каком виде должны быть представлены и проанализированы результаты.

5. Отчет включает титульный лист, формулировку целей работы, перечисление используемых приборов и материалов, краткую теорию, схемы или рисунки установок, основные характеристики установок, описание хода выполнения заданий, вида и особенностей представления результатов. Желательно заранее заготовить таблицы, чтобы сразу вносить туда получаемые результаты.

6. Включать установку и проводить измерения можно только с разрешения преподавателя или лаборанта. Результаты измерений записываются на отдельных листах, прилагаемых к заключительному отчету по работе, и визируются лаборантом или преподавателем.

7. Отчет по работе дополняется представлением результатов в виде таблиц и графиков, расчетами величин и погрешностей

и заключением. Работа считается сданной, если преподаватель принял отчет и студент удовлетворительно ответил на блок вопросов практикума.

Построение графиков

1. График выполняется на миллиметровой бумаге, на которую наносятся координатные оси. Для величины, зависимость от которой рассматривается, всегда используется ось абсцисс.

2. График должен содержать надпись, из которой было бы ясно физическое содержание представленной закономерности.

3. На оси наносится масштаб (а не измеренные величины). При выборе масштаба необходимо помнить, что точность построения графика должна быть не ниже точности измерений. В конце оси около стрелки проставляется переменная и, через запятую, знак единицы измерения.

Начало отсчета на графике не обязательно начинать с нуля, иногда удобнее выбирать округленное число, отличное от нуля. На концах осей указываются откладываемые величины и, через запятую, используемые единицы их измерения.

4. Если не удастся выбрать масштаб графика в соответствии с погрешностями, экспериментальные значения величин (точки) отчетливо наносятся вместе с погрешностями – отрезками длиной в доверительный интервал (или систематическую погрешность), расположенными параллельно соответствующей оси.

Экспериментальная кривая проводится плавно через доверительные интервалы всех или большинства экспериментальных точек так, чтобы экспериментальные точки наиболее близко и равномерно располагались с разных сторон кривой.

5. При изображении нескольких кривых на одном поле графика каждая из них нумеруется или выделяется каким-то другим способом.

6. Если неизвестная величина определяется по графику, то необходимо все построения для нахождения этой величины нанести на график.

Точность записи результатов измерений и правила округлений

Точность записи (число значащих цифр) отдельных измерений и последующих вычислений при их обработке должна быть согласована с необходимой точностью результата измерения.

1. При числе измерений менее 100 окончательную погрешность результата измерения следует округлять до одной значащей цифры. Например, если расчет погрешности дает 0,345 м/с, то это значение нужно округлить до 0,3 м/с. Исключение – если первая значащая цифра в погрешности 1, то сохраняют две значащие цифры в погрешности. Например, некоторый расчет дал погрешность 0,14, округлив это значение до 0,1, уменьшим ошибку сразу на 40%, поэтому правильнее привести в качестве погрешности величину 0,14.

2. Число цифр в результатах промежуточных расчетов обычно должно быть на одну больше, чем в окончательном результате. Погрешности при промежуточных вычислениях должны быть выражены не более чем тремя значащими цифрами.

3. Когда погрешность в измерении рассчитана, необходимо проанализировать, какие цифры в измеренной величине являются значимыми. Например, утверждение $L=127,547\pm 2$ см неверно. Погрешность 2 означает, что вместо цифры 7 на третьем месте от начала в действительности может быть любая цифра в интервале от 5 до 9, последующие же цифры 5, 4 и 7 приводить вовсе бессмысленно, и они должны быть округлены. Корректная запись результата будет выглядеть так $L=128\pm 2$ см. Т.е. округлять результат измерения следует так, чтобы он оканчивался цифрой того же разряда, что и значение погрешности.

4. Если первая (слева направо) из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр меньше 5, то оставшиеся цифры не изменяют. Лишние цифры в целых числах заменяют нулями, а в десятичных дробях отбрасывают. Например, при сохранении четырех значащих цифр число 782 447 должно быть округлено до 782 400; число 283,437 – до 283,4.

5. Если первая из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр равна 5, а за ней не следует никаких цифр или идут нули, то округление производят до ближайшего четного числа, т.е. четную последнюю цифру или нуль оставляют без изменения, нечетную увеличивают на единицу. Например, при сохранении трех значащих цифр число 264,50 округляют до 264; число 645,5 округляют до 646.

6. Если первая из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр больше или равна 5, но за ней следует отличная от нуля цифра, то последнюю оставляемую цифру увеличивают на единицу. Например, при сохранении трех значащих цифр число 17,58 округляют до 17,6; число 18598 – до 18600; число 352,512 – до 353.

В настоящее время выработаны некоторые общие правила записи физических констант, результатов измерений и расчетов, ставшие фактическим стандартом. Все указанные исходные данные, предполагаемые для дальнейшего использования, записывают только значащими цифрами (в виде десятичных дробей). Запятую ставят сразу после первой отличной от нуля цифры, а число (в составе значащих цифр) умножают на десять в соответствующей степени. Нули, стоящие в начале или конце числа, как правило, не записывают. Например, числа 0,00435 и 234000 записывают в виде $4,35 \cdot 10^{-3}$ и $2,34 \cdot 10^5$. Подобная запись, иногда называемая стандартной, упрощает возможные дальнейшие вычисления, особенно в случае формул, удобных для логарифмирования (т.е. умножение, деление, возведение в степень и т.п.), именно в такой стандартной форме в физических справочниках приводят основные физические константы.

Рекомендации по написанию Заключения к лабораторной работе

Заключение к лабораторной работе является учебной моделью написания выводов для всякого научного исследования. Текст «Заключения» должен дать читателю возможность в короткое время, не обращаясь к самой работе, получить ясное представление о полученных в работе результатах и способах их получения.

Написание «Заключения» требует от студента четкого понимания, что он делал и что получил, умения пользоваться научной терминологией, обобщать и делать выводы.

Заключение к лабораторной работе должно формально содержать следующие основные блоки:

1. Краткое описание того, что, каким методом и на каком оборудовании выполнялось. При этом не должно быть пересечений с описанием, данным во введении к лабораторной работе, т.е. не следует переписывать в заключении введение.

2. Описание выбранного диапазона, в котором производились измерения, интервалов между измерениями и количества измерений и обоснование такого выбора.

3. Описание, каким методом обрабатывались данные (если это имело место) и как использовались результаты, например, строились графики, рассчитывались константы и т.д.

4. Описание полученных графиков. При этом необходимо различать экспериментальные данные и построенные по ним кривые и теоретические зависимости. Важно понимать следующее:

– не обязаны совпадать экспериментальные данные и теоретические зависимости;

– никакая экспериментальная зависимость не является абсолютно достоверной, т.к. всегда могут при дополнительных измерениях найтись точки, изменяющие картину;

– степень достоверности зависит от количества данных (и распределения их в диапазоне измерений) и их погрешностей;

– с помощью эксперимента нельзя доказать или проверить теорию, ибо экспериментальные данные могут лишь свидетельствовать в пользу той или иной теоретической модели, поэтому принято говорить о степени согласия с теорией. Например, неверно: «полученные данные доказывают справедливость закона сохранения механической энергии». Нужно: «полученные данные находятся в хорошем согласии с законом сохранения механической энергии».

5. Описание результатов, полученных из анализа графиков или другими методами, а также их погрешностей, с указанием, как эти погрешности рассчитывались. При этом необходимо указать характер погрешности: случайный, приборный систематический.

6. Обсуждение источников погрешностей. Необходимо попытаться найти реальную причину неточностей в методике эксперимента или в характеристиках экспериментального оборудования. Недопустимо формально ссылаться на неточность приборов, объясняя этим неудачные результаты.

7. Обсуждение согласия теории (если такая имеется) и эксперимента. Необходимо обязательно указать, совпали ли результаты в пределах погрешности или нет. Здесь необходимо также высказать своё мнение и допустимы неточные оценки: «удовлетворительно согласуется, находится в хорошем согласии, не согласуется» и т.д.

Заключение чаще всего пишется в безличной форме. Пример: «В данной работе исследовалась зависимость ...». Не рекомендуется писать от первого или третьего лица. Необходимо строго соблюдать единый стиль изложения, недопустимо использовать чрезмерно усложнённые грамматические конструкции, пытаться все заключение написать одним предложением, нарушать последовательность изложения и делать смысловые разрывы в тексте.

В заключение не принято вставлять таблицы с результатами измерений, допустимы лишь небольшие таблицы с окончательными результатами. Недопустимо вклеивать в заключение графики и иллюстрации, на них можно и нужно ссылаться. Каждый результат необходимо сравнивать с табличными или теоретическими значениями. Не рекомендуется представлять экспериментальные и табличные значения в разных системах единиц. В заключении необходимо обсуждать расхождение в экспериментальных и табличных значениях.

Лабораторная работа №1
ИЗУЧЕНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО
ИЗЛУЧАТЕЛЯ И РАБОТА С ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКОЙ
БУЛАТ LRS–300AU

Цели работы:

- а) ознакомление с конструкцией и элементами исследуемого лазера;
- б) получение представления о методах и устройствах, предназначенных для юстировки лазерных систем;
- в) привитие практических навыков настройки/юстировки лазеров;
- г) выработка навыков технологической работы лазера;
- д) ознакомление с методом расчета энергетических характеристик лазерного излучения.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Лазерный излучатель, служащий для генерации электромагнитного излучения оптического диапазона с уникальными свойствами, структурно состоит из следующих основных элементов: активной среды, источника накачки и резонатора.

Активная среда – это вещество, в котором может быть создана инверсная населённость энергетических уровней, т.е. достигнуто такое состояние, когда число атомов, находящихся на верхнем «рабочем» энергетическом уровне, превышает число атомов, находящихся на нижнем «рабочем» энергетическом уровне. По типу активной среды лазеры подразделяются на твердотельные, газовые, полупроводниковые, жидкостные и др. На практике активную среду твердотельных лазеров часто также называют активным элементом. Поставщиком энергии для достижения состояния инверсной населённости служит источник накачки, в качестве которого может выступать, например: лампа–вспышка, газовый разряд, инжекция носителей тока в полупроводниковых р–п переходах, тепловой способ, химическая реакция и др.

Важнейшей и неотъемлемой частью любого лазера является резонатор – система, состоящая, как правило, из двух отражающих

поверхностей, между которыми располагается активная среда. Отражающие поверхности могут представлять собой зеркала различной формы (плоские, сферические, параболические и др.), грани призм полного внутреннего отражения или границы раздела сред с различными показателями преломления.

Зеркала лазера чаще всего формируются путём нанесения многослойных отражающих диэлектрических покрытий на одну из отполированных по специальной технологии поверхностей основы зеркала – на так называемую подложку. На другую поверхность подложки зеркала либо наносят просветляющее покрытие, либо её оставляют без покрытия. Поверхность зеркала с отражающим покрытием называется «рабочей», одно из зеркал резонатора, полностью отражающее свет, – «глухим», а зеркало, частично пропускающее излучение, – выходным.

Основным назначением оптического резонатора является создание условий, при которых возникающее в активной среде излучение, многократно проходя через её структуру, усиливается до уровня превышения имеющихся потерь. Следовательно, резонатор осуществляет положительную обратную связь. Другим его немаловажным свойством является спектральная селекция излучения. Самым простым и наиболее распространённым видом резонатора является система из двух плоских зеркал, обращённых друг к другу отражающими поверхностями, называемая эталоном Фабри–Перо.

Под юстировкой системы в общем случае понимают совокупность операций по приведению её элементов в состояние, обеспечивающее правильное функционирование системы. Юстировка оптических систем заключается в регулировании взаимного расположения оптических деталей (линз, призм, зеркал и т.п.) с целью их центрирования и обеспечения наилучшего качества изображения. В съюстированном положении оптические детали закрепляются винтами, штифтами либо склеиваются. Физический смысл процесса юстировки лазера состоит в нахождении такого

расположения его оптических элементов (активной среды, зеркал резонатора и т.п.) друг относительно друга, при котором потери излучения минимальны. На практике юстировку разделяют на «холодную» (или грубую) и «горячую» (или тонкую). В первом случае широкое практическое применение получил метод так называемого оптического рычага, для реализации которого необходим вспомогательный юстировочный лазер – низкоинтенсивный лазер, генерирующий излучение в видимом диапазоне. Источник же накачки юстируемого лазера в этом случае не включается. «Горячая» юстировка осуществляется уже при непосредственном включении источника накачки юстируемого лазера, что позволяет учесть термооптические особенности настраиваемой системы. Данный вид юстировки производится с использованием специальных средств, в качестве которых обычно выступают: визуализаторы и регистраторы излучения (например, копировальная бумага, фотобумага и др.), фотоприёмник, измеритель энергии/мощности лазерного излучения и др.

Для оценки степени чувствительности лазерного резонатора к разъюстировке служит разъюстировочная характеристика, представляющая собой зависимость параметров лазерной генерации от угла отклонения одного из зеркал резонатора относительно съюстированного положения.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Конструкция лазерной установки LRS-300AU представлена на рис. 1. Состоит из: 1 – блока питания и охлаждения; 2 – лазерного излучателя с оптической контрольно-фокусирующей системой; 3 – пульта управления; 4 – автоматизированным двухкоординатным столом; 5 – ручного двухкоординатного стола; 6 – поворотного узла; 7 – поддона для резки (опция); 8 – оптической контрольно-фокусирующей системы.



Рис. 1. Внешний вид установки

Лазерная установка имеет два рабочих места первое с ручным координатным столом (5), второе с автоматизированным координатным столом (4). Лазерный излучатель (2) на поворотном механизме (7) имеет возможность поворачиваться для работы, как с ручным, так и с автоматизированным координатным столом. Лазерный излучатель (2) вместе с пультом управления (3) имеет возможность перемещения по вертикали, что позволяет расширить технологические возможности установки. Кроме того, конструкцией изделия предусмотрена возможность плавного перемещения ручного координатного стола в вертикальной плоскости.

Внутри блока питания и охлаждения (1), в правой части, на вертикальных панелях расположен источник электропитания лазерной установки. В левой части размещена система охлаждения излучателя – насосы, теплообменник, фильтры, контрольные устройства и пр. На задней панели корпуса размещены коммутационные элементы.

Наличие в составе установки оптической контрольно-фокусирующей системы с бинокулярной насадкой позволяет производить точное позиционирование места сварки в зоне обработки и контролировать выполнение технологических операций. Система наблюдения оснащена двухступенчатой защитой

глаз оператора от воздействия лазерного излучения: с помощью оптического светофильтра и жидкокристаллического затвора, работающего синхронно с излучателем лазера.

Основные принципы функционирования установки

Рабочим инструментом установки является сфокусированный луч импульсного твердотельного лазера, работающего в режиме свободной генерации. Его энергетическое воздействие позволяет за время от 10^{-3} до 10^{-2} секунд произвести нагрев с последующим локальным плавлением поверхности металла в пятне, диаметром от 0,3 до 2 мм.

Основным элементом лазера является специальное устройство – квантрон, конструктивно объединяющий в себе активный элемент, газоразрядную лампу накачки и керамический отражатель. Отражатель направляет световую энергию, излучаемую лампой накачки, в активный элемент лазера. Активный элемент представляет собой стержень из алюмоиттриевого граната, активированного ионами неодима. Он размещен в оптическом резонаторе лазера, образованном диэлектрическими зеркалами.

Лампа накачки – газонаполненная герметичная конструкция из кварцевого стекла с двумя электродами. Световая энергия вспышки лампы поглощается активным элементом, переводя ионы неодима в возбужденное состояние, что в свою очередь приводит к генерации лазерного излучения. Малая расходимость лазерного луча позволяет фокусировать его энергию в пятне небольшого диаметра. При этом температура в зоне обработки может достигать несколько тысяч градусов.

Оптическая система установки

Оптическая система установки обеспечивает генерацию и формирование лазерного излучения. Кроме того, она обеспечивает возможность визуального наблюдения за выполнением технологического процесса. Оптическая схема установки приведена на рис. 2 и включается в себя:

1. Зеркало глухое;
2. Заслонка электромеханическая;
3. Лампа накачки;
4. Отражатель;
5. Активный элемент;
6. Зеркало выходное;
7. Отрицательная линза телескопа;
8. Телескоп;
9. Положительная линза телескопа;
10. Зеркало поворотное;
11. Объектив фокусирующий;
12. Защитное стекло;
13. Защитный светофильтр;
14. Жидкокристаллический затвор;
15. Бинокулярная насадка.

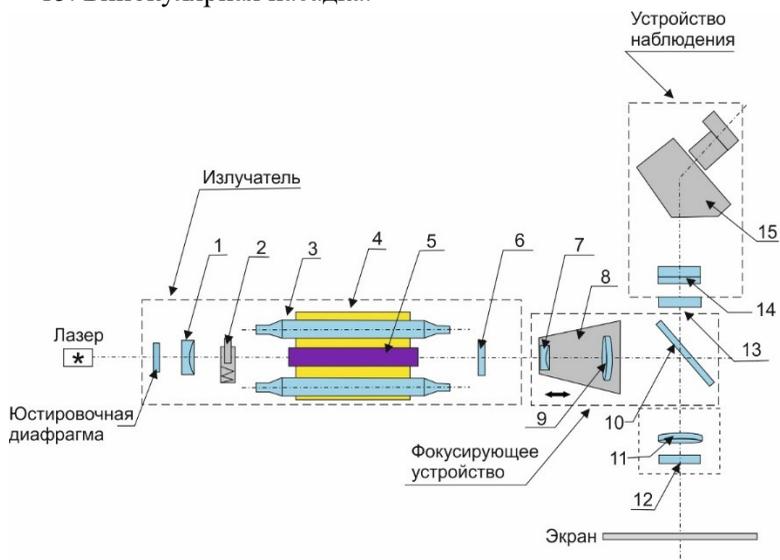


Рис. 2. Оптическая схема установки

Основные узлы оптической системы

Излучатель. В корпусе излучателя (рис. 3) установлены: квантрон (1), зеркала резонатора (2) и электромеханическая заслонка (3). Сверху излучатель закрывается крышкой. Квантрон объединяет в своем герметичном металлическом корпусе отражатель, представляющий собой керамический моноблок с диффузным отражением, активный элемент (4) и две лампы накачки (5). Активный элемент – кристалл $YAG:Nd^{+3}$ длиной 130 мм и диаметром 8 мм. Лампа накачки типа ИНП–6/120 с ксеноновым наполнением. Конструкция лампы оптимизирована для импульсного режима работы. Размер разрядного канала лампы $\varnothing 6 \times 120$ мм. Для питания лампы к ее электродам при помощи изолированных наконечников (5) подключаются провода от источника питания. При установке и подключении лампы необходимо соблюдать полярность согласно маркировке на лампе и корпусе квантрона (символы «+и «-»). Инициирование разряда лампы (поджиг лампы) осуществляется путем подачи высоковольтного импульса на корпус квантрона, установленного на изолирующем основании (7).

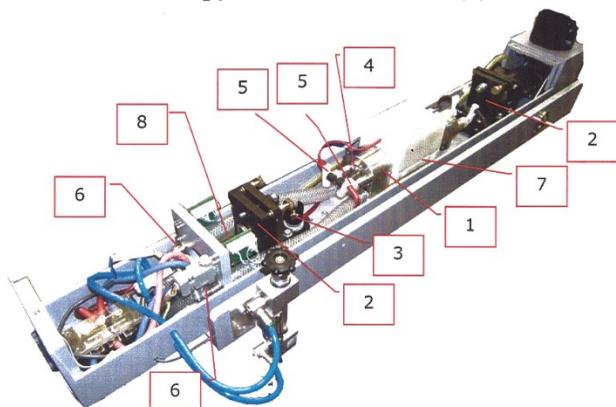


Рис. 3. Устройство излучателя

Точная юстировка зеркал резонатора (2), закрепленных на юстировочных столиках, обеспечивает максимальный уровень энергии лазера и равномерность пятна излучения лазера.

Юстировка производится в двух взаимно перпендикулярных плоскостях путем вращения соответствующих микрометрических винтов.

Между квантроном и глухим зеркалом располагается электро-механический затвор (3), который по команде открывает резонатор лазера и тем самым разрешает генерацию лазерного излучения. В нормальном состоянии затвор закрыт, что предотвращает опасность случайного воздействия излучения на оператора при наладочных работах или в аварийной ситуации. Датчик энергии (8) располагается после глухого зеркала. Ввод и вывод охлаждающей дистиллированной воды осуществляется через штуцеры (б), к которым подсоединяются шланги системы охлаждения лазера.

Оптическая система наблюдения и фокусирующая система

Оптическая система наблюдения (рис. 4) состоит из бинокулярной насадки видеокамеры (2), жидкокристаллического затвора (3), объектива (4).

Конструктивно жидкокристаллический затвор выполнен в одном блоке с защитным светофильтром. Это комбинированное устройство обеспечивает защиту глаз оператора от воздействия отраженного и рассеянного лазерного излучения, а также от излучения раскаленной поверхности детали и от факела, образующегося при воздействии лазерного излучения на поверхность детали. В одном из окуляров окулярной насадки установлена сетка с перекрестием. Перекрестие совмещено с изображением центра лазерного пятна и указывает место, в которое будет оправлено лазерное излучение.

Фокусирующая система состоит из телескопа, поворотного зеркала с регулировкой, скрытой под крышкой (5), фокусирующего объектива и защитного стекла. Конструктивно телескоп и поворотное зеркало выполнены в виде двух отдельных узлов. Телескоп оснащен ручкой регулировки с лимбом (6), вращением которой можно изменять диаметр пятна сфокусированного

излучения на поверхности обрабатываемой детали. Диаметр пятна меняется от 0,3 мм в положении «0» до 2 мм в положении «12». При вращении лимба по часовой стрелке или против нее перетяжка луча соответственно будет либо подниматься над плоскостью фокусировки, либо опускаться под нее. После телескопа излучение попадает на поворотное зеркало. Оправа поворотного зеркала снабжена юстировочными винтами 1 (рис. 5), при помощи которых производится совмещение перекрестия сетки окуляра бинокулярной насадки с осью излучения лазера. Доступ к юстировочным винтам осуществляется через отверстие в передней стенке корпуса излучателя, закрываемого крышкой (5) (рис. 4).



Рис. 4. Оптическая система наблюдения и фокусирующая система

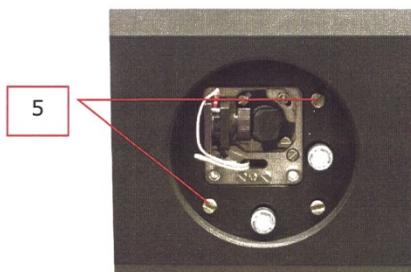


Рис. 5. Узел юстировки поворотного зеркала

Излучение, отражённое от поворотного зеркала, направляется в фокусирующий объектив (4) (рис. 4), фокусное расстояние кото-

рого составляет 100 мм. На выходе объектива устанавливается защитное стекло. Для уменьшения потерь энергии лазера на поверхности объектива и защитного стекла нанесены просветляющие покрытия. В процессе работы защитное стекло может загрязняться продуктами обработки. Его необходимо периодически очищать или при повреждении и сильном загрязнении – заменить на новое.

В узле крепления квантрона (7) (рис. 3) располагается поджигающее устройство, предназначенное для формирования высоковольтного импульса напряжением до 25 кВ и длительностью 1 мкс, инициирующего разряд дежурной дуги в лампе накачки. Стартовое напряжение, подаваемое на электроды лампы источником питания перед поджигом дежурной дуги, составляет не менее 800 В. После зажигания дежурной дуги в лампе формируется слаботочный электрический разряд, обеспечивающий проводимость, необходимую для протекания силового разряда. Напряжение на электродах лампы при токе дежурной дуги 0,2–1,0 А напряжение 170 В.

В излучателе предусмотрен быстродействующий электро-механический затвор, блокирующий канал генерации в закрытом состоянии. Питание электро-механического затвора осуществляется низковольтным источником тока с напряжением 2,6 В и током 50 мА.

ВНИМАНИЕ!

В ИЗЛУЧАТЕЛЕ ПРИСУТСТВУЕТ ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ. КОРПУС ИЗЛУЧАТЕЛЯ ОБЯЗАТЕЛЬНО ДОЛЖЕН БЫТЬ ЗАЗЕМЛЁН. ОТКРОЙТЕ КРЫШКУ ИЗЛУЧАТЕЛЯ И ПРОВЕРЬТЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ (ЖЁЛТО–ЗЕЛЁНЫЙ ПРОВОД).

Меры безопасности при работе с излучателем

Факторами опасности при работе излучателя в составе лазера являются: прямое, отраженное и рассеянное лазерное излучение; высокое напряжение.

При работе лазерный излучатель должен быть закрыт крышкой;

- система блокировок должна быть исправной;
- при снятой крышке излучателя система блокировок должна отключать электропитание лампы накачки;
- электромеханический затвор должен перекрывать резонатор лазера;
- при каждом импульсе лазерного излучения оптический затвор на жидких кристаллах должен быть в закрытом состоянии;
- при юстировке оптических элементов рекомендуется пользоваться защитными очками с фильтрами из стекла СЗС–22;
- зона обработки лазерным лучом должна быть закрыта экранами, непрозрачными для излучения, и защищающими оператора от возможного попадания на него отраженного излучения.

Меры электробезопасности

- при работе лазера все токоведущие части должны быть недоступны для оператора;
- блокировки должны быть исправны;
- корпус излучателя должен быть заземлен.

Пульт управления

Расположение органов управления на модуле управления и индикации показано на рис. 6 и 7. На пульте управления (рис. 6) расположены: ключ включения лазера, кнопка «СТАРТ», кнопка аварийного отключения «EMERGENCY STOP», кнопки «СТОП», «ВНЕШНИЙ СВЕТ», «ОСЕВОЙ СВЕТ», «ОПЦИЯ» (не используется):

– Кнопка подачи сетевого питания «СТАРТ» – включение контактора сетевого питания, источников вспомогательного питания и системы охлаждения.

– Кнопка EMERGENCY (СТОП) – аварийное отключение сетевого питания ИП.

– Ключ при повороте ключа обеспечивается безопасное включение/выключение сетевого питания всего ИП из рабочего режима.

- Кнопка СТОЛ – включение координатного стола.
- Кнопка ВНЕШНИЙ СВЕТ – включение внешнего света.
- Кнопка ОСЕВОЙ СВЕТ – включение осевого света.
- Кнопка ОПЦИЯ – не используется.

На панели управления (рис. 7) осуществляется изменение режимов работы и отображение текущей информации о состоянии установки. Графическое отображение информации на экране может изменяться при работе с различными параметрами. Зона отображения функций кнопок показывает, какие параметры будут меняться при нажатии на блок кнопок в данный момент. В зависимости от выбранных изменяемых параметров графическое отображение информации может быть в следующем виде:



Рис. 6. Пульт управления

Вариант 1 «РАБОТА»

Данный вариант отображения информации предназначен для включения лазера, запуска лазера, для включения разрешения на подачу защитного газа, для вызова ранее сохраненных параметров работы лазера. Если дисплей отображения соответствует рис. 6, то значения кнопок будут следующими:

Кнопка «1» – Переход в режим редактирования параметров.

Кнопка «2» – Включение силовой части, поджиг дежурной дуги, заряд конденсаторов.

Кнопка «3» – Подача импульсов излучения в зону обработки (только при включенной силовой части Кнопка «2»).

Кнопка «4» – Включение предварительного разрешения на подачу газа к месту обработки.

Кнопка «5» – Переход в режим сохранения и редактирования файлов (совокупности параметров для данного технологического процесса).



Рис. 7. Расположение информационных зон на панели управления



Рис. 8. Расположение индикаторов на панели управления

Вариант 2 «ПАРАМЕТРЫ»

Данный вариант отображения информации позволяет изменять параметры лазерного излучения и режим работы. Информация,

отображаемая в зоне параметров и во вспомогательной информационной зоне, аналогична рис. 9. Зона функций кнопок и соответствующие кнопки имеют следующие значения:

Кнопка «1» – Переход в режим работы установки.

Кнопка «2» – Увеличение выбранного параметра (выбранный параметр красным).

Кнопка «3» – Уменьшение выбранного параметра (выбранный параметр красным).

Кнопка «4» – Перемещение вверх по отображаемым параметрам.

Кнопка «5» – Перемещение вниз по отображаемым параметрам.

Примечания по выбору и установке лазерных параметров и режимов работы:

– Напряжение на накопителе устанавливается в диапазоне от 200 В до 500 В с шагом 5 В.

– Длительность импульсов устанавливается в диапазоне от 0,2 до 20,0 мс с динамическим шагом.

– Выбор режима работы – одиночные импульсы или частотный режим с заданной частотой, частотой повторения импульсов. Частота повторения импульсов устанавливается через 1 Гц в диапазоне от 1 до 100 Гц.

– Выбор режима синхронизации – режим «Частота/Одиночный» (ведущий) и режим «Ведомый».

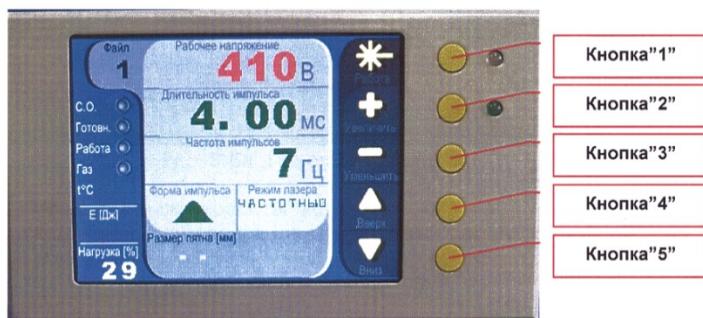


Рис. 9. Расположение индикаторов на панели управления

Вариант 3 «ФАЙЛ»

Данный вариант отображения информации предназначен для работы с файлами (наборами параметров работы лазера). В этом режиме можно сохранить параметры лазерного излучения, отображаемые в настоящий момент на экране, в память контроллера в различные ячейки. Также можно загрузить ранее сохраненные параметры. Информация, отображаемая в зоне параметров и во вспомогательной информационной зоне, аналогична рис. 10. Зона функций кнопок и соответствующие кнопки имеют следующие значения:

Кнопка «1» – Переход в режим работы установки.

Кнопка «2» – Увеличение номера файла (выбранный параметр отображается красным).

Кнопка «3» – Уменьшение номера файла (выбранный параметр отображается красным).

Кнопка «4» – Сохранить параметры, отображаемые на дисплее, в номер файла, выделенный красным.

Кнопка «5» – Загрузить на дисплей параметры, ранее сохраненные, из номера файла, выделенного красным.

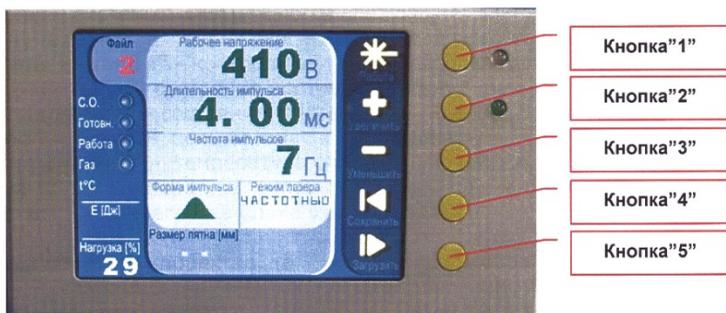


Рис. 10. Расположение индикаторов на панели управления

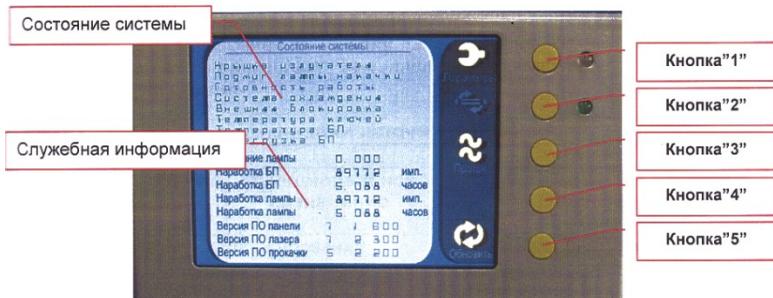


Рис. 11. Панель управления

Вариант 4 «СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ»

Данный вариант информации предназначен для отображения информации об ошибках, неисправностях и служебной информации. Данная информация отображается на дисплее в случае возникновения неисправности или размыкании цепей безопасности. Также возможен выход на такой вариант отображения информации следующим образом: находясь в рабочих режимах рис. 8-9 нажать Кнопку «1» и удерживать ее в течении 5 секунд.

Визуальный контроль качества излучения

ВНИМАНИЕ! ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ЗАЩИТНЫЕ ОЧКИ!

Для оценки пространственного распределения лазерного излучения проводится визуальный контроль формы пятна генерации на выходе из оптической системы. Для этих целей используют специальный визуализатор, который обеспечивает преобразование невидимого излучения YAG:Nd с длинной волны 1064 нм в видимое пятно зелёного цвета на рабочей области визуализатора. Рабочая область визуализатора представляет собой люминесцентный керамический диск, который закреплен в металлическом держателе. Пятно на рабочей области в форме равномерно светящегося круга является свидетельством качественной юстировки.

Для проведения визуального контроля необходимо:

1. Включить установку;
2. Установить на панели управления значение «Напряжение» равным 220В, «Длительность» 1 мс, «Частота» 5 Гц, режим – «частотный» и запустить лазер с помощью ножного переключателя «Педаль»;
3. Расположить визуализатор под объективом на расстоянии приблизительно 200–250 мм. При этом в рабочей области визуализатора добиться изображения светящегося пятна зеленого цвета.

ВО ИЗБЕЖАНИЕ ПРЕЖДЕВРЕМЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ ВИЗУАЛИЗАТОРА ДИАМЕТР ПЯТНА ДОЛЖЕН ЗАНИМАТЬ НЕ МЕНЕЕ 80–90% ДИАМЕТРА РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ ВИЗУАЛИЗАТОРА!

ВНИМАНИЕ! ЗАПРЕЩАЕТСЯ ПОМЕЩАТЬ ВИЗУАЛИЗАТОР В ОБЛАСТЬ ПЕРЕТЯЖКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ – ЭТО МОЖЕТ ПРИВЕСТИ К РАЗРУШЕНИЮ ВИЗУАЛИЗАТОРА И ТРАВМЕ ОПЕРАТОРА!

4. Оценить форму пятна излучения на поверхности рабочей области визуализатора. Пятно должно иметь вид равномерно светящегося круга (см. рис. 12). Если пятно имеет иную форму – необходима подъюстировка резонатора.

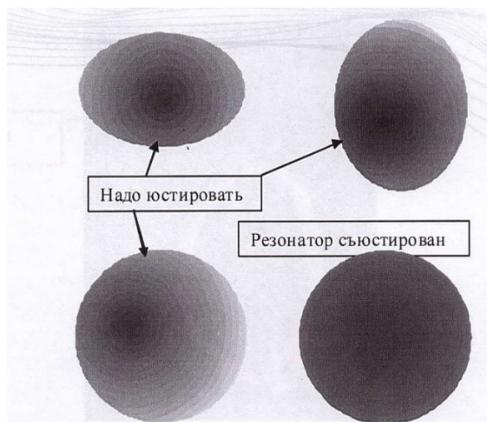


Рис. 12. Различные формы пятен излучения на поверхности визуализатора

Подъюстировка резонатора

ВНИМАНИЕ! ПОДЪЮСТИРОВКА ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ПРИ СНЯТОЙ КРЫШКЕ ИЗЛУЧАТЕЛЯ – СТРОГО СОБЛЮДАТЬ МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ! ПРЕЖДЕ ЧЕМ СНЯТЬ КРЫШКУ ИЗЛУЧАТЕЛЯ ОЦЕНИТЬ РИСКИ ДЛЯ ЖИЗНИ И ЗДОРОВЬЯ!

Факторами опасности при работе излучателя являются:

- прямое, отраженное и рассеянное излучение лазера
- высокое напряжение

Меры безопасности при подъюстировке:

1. Проверить заземление корпуса излучателя.
2. Запрещается перекрывать оптический тракт, а также вносить в него любые предметы (особенно с металлической, зеркальной поверхностью).
3. Запрещается дотрагиваться до металлических и токоведущих частей в излучателе.
4. Допускается воздействие **только** на юстировочные винты держателя **глухого (заднего)** зеркала (рис. 13).
5. Пользоваться защитными очками с фильтрами из стекла СЗС–22.

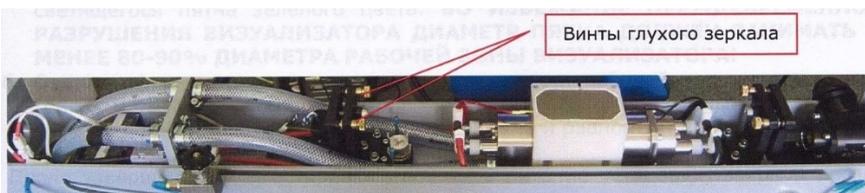


Рис. 13. Положение держателя заднего зеркала и места установки магнита

Подъюстировка заключается в изменении положения глухого зеркала резонатора непосредственно при работе лазера. При этом необходимо добиться того, чтобы форма пятна лазерного излучения, контролируемая визуализатором на выходе из резонатора, максимально приблизилась к окружности.

Процесс осуществляется в следующей последовательности:

1. Снять крышку излучателя.
2. Положить магнит на геркон (рис. 14).



Рис. 14. Место установки магнита

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ! ЭТО ДЕЙСТВИЕ ОТКЛЮЧАЕТ СИСТЕМУ БЛОКИРОВКИ, И ВОЗМОЖНА РАБОТА УСТАНОВКИ БЕЗ КРЫШКИ ИЗЛУЧАТЕЛЯ

3. Включить установку;
4. Установить на панели управления значение «Напряжение» равным 220 В, «Длительность» 1 мс, «Частота» 5 Гц и запустить лазер с помощью ножного переключателя «Педаль».

5. Расположить визуализатор под объективом на расстоянии приблизительно 200–250 мм. При этом в рабочей области визуализатора добиться изображения светящегося пятна зеленого цвета. **ВО ИЗБЕЖАНИЕ ПРЕЖДЕВРЕМЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ ВИЗУАЛИЗАТОРА ДИАМЕТР ПЯТНА ДОЛЖЕН ЗАНИМАТЬ НЕ МЕНЕЕ 80–90% ДИАМЕТРА РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ВИЗУАЛИЗАТОРА!**

6. Оценить форму пятна генерации на поверхности рабочей зоны визуализатора (рис. 12). Вращая юстировочные винты (рис. 13) шестигранным ключом либо руками, добиться округлости светящегося пятна и равномерности заполнения;

7. После завершения подъюстировки отключить питание установки, закрыть крышку излучателя.

Схема экспериментальной установки для выполнения настоящей лабораторной работы представлена на рис. 2, с использованием вспомогательного юстировочного лазера; юстировочную диафрагму (металлическое зеркало с отверстием); 1 – «глухое» зеркало резонатора; 5 – активный элемент юстируемого лазера; 6 – выходное зеркало резонатора; юстировочный экран (люминесцентный керамический диск); 10 – вспомогательное поворотное зеркало. Юстируемый в настоящей работе лазерный излучатель структурно состоит из твердотельного активного элемента 5 цилиндрической формы и двух ламп накачки 3. Также в состав лазерного излучателя входят импульсная лампа накачки и оптический отражатель. Последний предназначен для передачи световой энергии от лампы накачки к активной среде. Все вышеназванные компоненты (за исключением зеркал) конструктивно размещены в едином корпусе – так называемом квантроне.

Активный элемент юстируемого твердотельного лазера изготовлен из иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами неодима (ИАГ: Nd³⁺). Генерация излучения осуществляется на длине волны $\lambda = 1,064$ мкм.

Все юстируемые компоненты твердотельного лазера размещены в специальных оптико-механических узлах – так называемых подвижках, устройство которых позволяет проводить как линейные, так и угловые перемещения объектов в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

«Горячая» юстировка выполняется путём использования визуализатора излучения и измерителя энергии/мощности.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Ознакомиться с методом «горячей» юстировки твердотельного лазера, используя визуализатор излучения и измеритель мощности луча лазера.

1. Получить разъяснения от преподавателя об особенностях выполнения данного задания.

2. Установить на выходе юстируемого лазерного излучателя визуализатор излучения.

ВНИМАНИЕ! Расстояние от выходного объектива до поверхности мишени должно быть не менее 10–20 см.

3. При участии (!) преподавателя включить источник накачки (блок питания) юстируемого лазера.

4. По шкале измерителя 10 оценить текущее числовое значение энергии/мощности лазерного излучения.

5. Разобраться с положением и назначением юстировочных винтов.

ВНИМАНИЕ! Данные действия проводятся лишь при обязательном (!) присутствии преподавателя. Юстировка осуществляется только самим преподавателем в случае, если это необходимо, при фиксированном значении энергии накачки блока питания.

7. Выключить блок питания юстируемого лазера.

8. Ознакомить преподавателя с результатами проделанной работы.

Задание 2. Оценить плотность мощности и энергию импульса, при которых начинаются процессы:

- а) Закалки стали
- б) Плавление поверхности стали
- в) Образование парогазового канала клиновидной формы
- г) Пробивка сквозных отверстий
- д) Наплавка стальной проволоки

Плотность мощности рассчитывается по формуле

$$J = \frac{4 E}{\tau \pi d^2},$$

где E – энергия импульса излучения (показания измерителя энергии излучения), τ – время импульса, d – диаметр сфокусированного луча, определяемый по положению ручки регулировки положением телескопа, согласно таблице 1.

Таблица 1. Значения положения регулятора телескопа и диаметра луча.

Положение регулятора телескопа	Диаметр d луча, мм
0	0,30
1	0,44
2	0,58
3	0,72
4	0,86
5	1,00
6	1,14
7	1,28
8	1,42
9	1,56
10	1,70
11	1,84
12	2,00

ВНИМАНИЕ: СОВЕТ ПО БЕЗОПАСНОСТИ!

1. Следите за положением обрабатываемой детали и рук перед лазерным выстрелом.
2. Следите, чтобы пальцы не попадали в поле зрения микроскопа.
3. Не отвлекайтесь во время работы.
4. При работе с лазером снимите драгоценности, потому что отраженное от них излучение может привести к ожогу.

Лабораторная работа №2

ИЗУЧЕНИЕ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА И РАБОТА С ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКОЙ LDesigner F1

Цели работы:

- а) ознакомление с конструкцией и элементами исследуемого лазера;
- б) получение представления о методе и устройствах определения распределения мощности излучения по диаметру луча лазера;
- в) привитие практических навыков работы с лазером LDesigner F1.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Волоконный лазер – лазер, активная среда, резонатор которого являются элементами оптического волокна. При полностью волоконной реализации такой лазер называется цельноволоконным, при комбинированном использовании волоконных и других элементов в конструкции лазера он называется волоконно-дискретным или гибридным. Волоконные лазеры применяются в промышленности для резки металлов и маркировки продукции, сварке и микрообработке металлов, линиях волоконно-оптической связи [1]. Их основными преимуществами являются высокое оптическое качество излучения, небольшие габариты и возможность встраивания в волоконные линии.

Существует большое разнообразие конструкций волоконных лазеров, обусловленное спецификой их применения. Для их изготовления широко применяются как резонаторы типа Фабри–Перо, так и кольцевые резонаторы [2-3]. Специальными методиками можно создать однополяризационные лазеры, лазеры сверхкоротких импульсов и другие [4-5]. Во всех волоконных лазерах применяются специальные типы оптических волокон, в которые встроены один или несколько волноводов для осуществления оптической накачки [6-8].

История

Впервые передачу лазерного излучения по оптическому волокну продемонстрировали Элиес Снитцер (англ. *Elias Snitzer*)

и Уилл Хикс (англ. *Will Hicks*) в 1961 году [9]. Основным недостатком их устройства было сильное затухание излучения при прохождении волокна. Однако через несколько лет Снитцером был создан первый лазер, в качестве рабочей среды которого использовалось оптическое волокно, легированное неодимом [10]. В 1966 г. Чарльз Као и Джордж Хокхам создали оптическое волокно, затухание в котором составляло около 20 дБ/км, в то время как иные существовавшие на то время волокна характеризовались затуханием более 1000 дБ/км. Информационная ёмкость волокна Као соответствовала двумстам телеканалам. Внутренний диаметр составлял около 4 микрон, а диаметр всего волновода около 400 микрон. Прогресс в производстве оптических волокон привлёк широкое внимание к ним как средству передачи сигналов на большие расстояния [9].

Стремительное развитие волоконных лазеров началось с конца 1980-х. Основные направления исследований были связаны с экспериментированием в использовании различных примесей в оптических волокнах для достижения заданных параметров генерируемого излучения. В частности, особый интерес представляла генерация сверхкоротких импульсов в инфракрасной области спектра. С 1993 года в сенсорике и сфере связи стали широко использоваться промышленные образцы эрбиевых лазеров [5]. В 1990-е годы мощность генерации эрбиевых лазеров превысила порог в 1 Вт, был продемонстрирован эрбиевый 4-х ваттный лазер [11]. После 2000 года привлекли к себе внимание иттербиевые лазеры, показавшие значительный потенциал для увеличения мощности [3].

В течение 1993-1994 годов небольшой коллектив сотрудников российской компании НТО «ИРЭ–Полюс» разработал первые прототипы волоконных усилителей света с диодной накачкой, по мощности превышающие зарубежные аналоги. Позже основатель этой компании В.П. Гапонцев создал международную корпорацию

IPG Photonics, которая в настоящее время контролирует 80% мирового рынка волоконных лазеров большой мощности.

Принципы работы

Общая схема

Волоконный лазер состоит из модуля накачки (как правило, широкополосные светодиоды или лазерные диоды), световода, в котором происходит генерация, и резонатора (рис. 15). Световод содержит активное вещество (легированное оптическое волокно – сердцевина без оболочки, в отличие от обычных оптических волноводов) и волноводы накачки [6]. Конструкция резонатора обычно определяется техническим заданием, но можно выделить наиболее распространенные классы: резонаторы типа Фабри–Перо и кольцевые резонаторы [5]. В промышленных установках для повышения выходной мощности иногда объединяют несколько лазеров в одной установке.

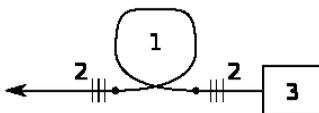


Рис. 15. Типичная схема волоконного лазера.

1 – активное волокно. 2 – брэгговские зеркала. 3 – блок накачки

Активное волокно

Сверхчистый плавленый кварц, который является основным материалом оптических волокон, обладает высокой прозрачностью (оптические потери – несколько процентов на километре длины). Специальные примеси, вводимые в кварц легированием, превращают его в активную среду. Исходя из требований на частоту излучения (инфракрасный диапазон для телекоммуникаций) и малую пороговую мощность накачки, как правило, легирование выполняют редкоземельными элементами группы лантаноидов. Одним из распространённых типов волокон является эрбиевое, используемое в лазерных и усилительных системах, рабочий

диапазон которых лежит в интервале длин волн 1530–1565 нм. Вследствие различной вероятности переходов на основной уровень с подуровней метастабильного уровня, эффективность генерации или усиления отличается для различных длин волн в рабочем диапазоне [12]. Степень легирования редкоземельными ионами обычно зависит от длины изготавливаемого активного волокна. В пределах до нескольких десятков метров она может составлять от десятков до тысяч ppm, а в случае километровых длин – 1 ppm и менее.

Накачка

Существуют различные конструкции накачки оптических волноводов, из которых наиболее употребительными являются чисто волоконные конструкции (рис. 16). Одним из вариантов является размещение активного волокна внутри нескольких оболочек, из которых внешняя является защитной (так называемое волокно с двойным покрытием).

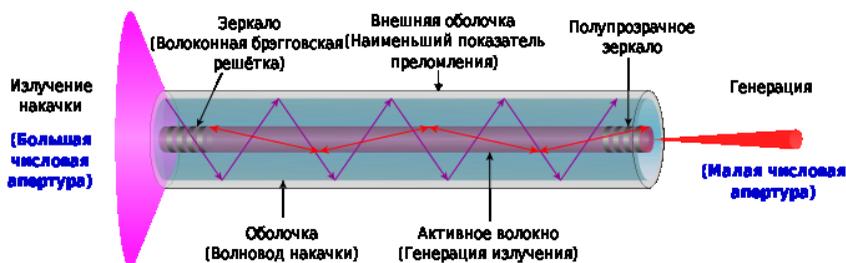


Рис. 16. Схема накачки лазера, основанного на волокне с двойным покрытием

Первая оболочка изготавливается из чистого кварца диаметром в несколько сотен микрометров, а вторая – из полимерного материала, показатель преломления которого подбирается существенно меньшим, чем у кварца (рис. 17). Таким образом, первая и вторая оболочки создают многомодовый волновод с большим поперечным сечением и числовой апертурой, в который запускается излучение накачки. Эффективное возбуждение ионов редко-

земельных элементов достигается подбором диаметров активной сердцевины и волновода накачки. По такой технологии можно получить выходную мощность порядка 100 Вт [7].

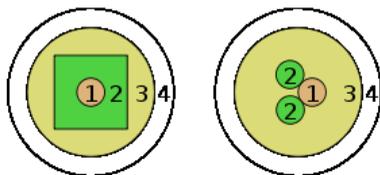


Рис. 17. Два различных типа оптических волокон для волоконных лазеров (не в масштабе). Слева: обычная схема с одним волноводом накачки, волокно с двойным покрытием. Справа: схема технологии GTWave с двумя волноводами накачки (для примера).

1. Сердцевина, легированная редкоземельными ионами.
2. Волновод накачки.
3. Общая оболочка.
4. Защитная оболочка.

Большие мощности накачки достигаются с помощью технологии GTWave. В одну защитную оболочку встраивается несколько сердцевины волноводов, одна из которых является активной средой, а другие – волноводами накачки. Накачка осуществляется благодаря эванесцентному полю, проникающему в активную среду через их стенки. Особенностью технологии являются возможность ввода излучения накачки через оба торца каждого из волноводов накачки и отсутствие необходимости в WDM–ответвителях [4,7].

Допустимую мощность накачки ограничивает предельная мощность излучения на единицу площади, которую выдерживает вещество без разрушения. Для чистого кремния она составляет 10^{10} Вт/см² (22 Дж/см² для импульса длительностью 1 нс на длине волны 1 мкм [13]). Таким образом, верхний предел мощности накачки для оптического волокна с диаметром сердцевины 8 мкм составляет около 5 кВт.

Резонаторы типа Фабри–Перо

Резонаторы, основанные на интерферометре Фабри–Перо, являются одними из самых распространённых [2]. Различия между ними заключаются в способе создания зеркал резонатора.

Резонаторы с использованием диэлектрических зеркал

В первых волоконных лазерах для создания резонатора Фабри–Перо применялись диэлектрические зеркала благодаря возможности создавать их практически прозрачными на длине волны накачки 0,82 мкм, сохраняя при этом высокий коэффициент отражения на длине волны генерации 1,088 мкм (таковы были параметры лазеров, где применялось волокно, легированное ионами Nd^{3+}). Вначале волокно размещалось между зеркалами, однако такую конструкцию было сложно юстировать. Частичное решение проблемы состояло в нанесении диэлектрических зеркал непосредственно на торцы волокна, что, однако, повышало риск их повреждения мощным сфокусированным излучением накачки и ужесточало требования к обработке торцов оптического волокна. Проблема защиты зеркал иногда решалась применением WDM–ответвителей [5].

Резонатор с использованием волоконных брэгговских решёток

Резонатор внутри оптического волокна создается парами внутриволоконных брэгговских решёток – участков оптического волновода, в которых создается структура с модулированным показателем преломления. Участки с измененным показателем преломления (штрихи) располагаются перпендикулярно оси волновода. Отражение от такой структуры происходит на длине волны

$$\lambda_B = 2n_{neff} \Lambda_B,$$

где n_{neff} – эффективный показатель преломления основной моды, Λ_B – период решётки. Характер отражения (полное или частичное) будет зависеть от её параметров. Ширина спектра отражения при большом количестве штрихов становится пропорциональной

коэффициенту связи k , связанному с коэффициентом отражения соотношением

$$R = \tanh^2 kL,$$

где L – длина решётки. На практике созданная внутри волокна брэгговская решётка имеет несколько иные параметры, так как само её создание меняет эффективный показатель преломления в месте нахождения решётки и, таким образом, саму её резонансную длину волны. Для внутриволоконных решёток являются опасными высокие температуры. Хотя в целом температура разрушения решётки существенно зависит от метода её создания и материала волокна, чаще всего критические температуры лежат в диапазоне 300–600°C [7,14]. Селективность по частоте брэгговских решёток позволяет получить лазер, работающий на одной продольной моде с узкой частотной полосой генерации [15]. В волоконных ВКР–лазерах иногда создают более одной пары брэгговских решёток на разные длины волн для достижения большего порядка рассеяния (каждый следующий порядок рассеяния изменяет длину волны фотонов, что позволяет достичь требуемой длины волны) [6].

Кольцевые резонаторы

Простейшей конструкцией кольцевого резонатора является соединение обоих концов WDM–ответвителя с активным волокном. Особенностью волоконных кольцевых резонаторов является пропускание света лишь в одном направлении независимо от частоты, за исключением некоторых резонансных частот. Набег фазы в таком резонаторе выражается формулой

$$\psi_1 = \pi + \varphi + 2 \tan^{-1} \frac{\sqrt{\rho} \sin \varphi}{1 - \sqrt{\rho} \cos \varphi},$$

где φ – набег фазы за счет длины резонатора, $\rho = P_{out}/P_{inp}$ – отношение мощностей на выходе и на входе отрезка волокна, образующего резонатор [5]. Обычно в кольцевых резонаторах применяются дополнительные изоляторы и поляризаторы, обеспечивающие сохранность поляризации излучения и одно-

направленность его распространения (рис. 18). Подобные конструкции появились ещё в 1958 году для неодимовых волоконных лазеров. Для лазеров с синхронизацией мод используют так называемые резонаторы в форме восьмёрки (англ. *figure-of-eight lasers*), названные так за форму соединения волокна. Обе петли резонатора в виде восьмерки служат в качестве петель Саньяка (рис. 19). Активное волокно размещается несимметрично по отношению к петлям резонатора, что создает нелинейную разницу фаз между встречными волнами и обеспечивает синхронизацию мод при превышении некоторой пороговой мощности накачки [3].

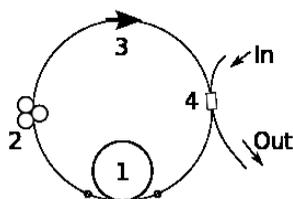


Рис. 18. Обычный кольцевой резонатор в волоконных лазерах, встроенный в волоконный лазер. **In**: излучение накачки. **Out**: выходное излучение. **1**: активное волокно. **2**: поляризатор. **3**: оптический изолятор. **4**: WDM-ответвитель

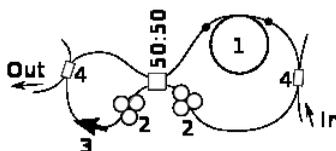


Рис. 19. Волоконный лазер с кольцевым резонатором в форме восьмерки. **In**: излучение накачки. **Out**: выходное излучение. **1**: активное волокно. **2**: поляризатор. **3**: оптический изолятор. **4**: WDM-ответвитель. **50:50** делитель 50/50

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Непрерывная и импульсная генерация

Лазеры непрерывной генерации

Исторически первыми вызвали интерес волоконные лазеры непрерывной генерации (англ. *CW-lasers*), легированные неодимом и работающие на длине волны около 0,8 мкм. Благодаря широкой полосе поглощения они хорошо перестраиваются в пределах 50–60 нм. Обычно они применяются для генерации на длинах волн более 1,36 мкм, для более коротких длин волн применяется легирование неодимом ZBLAN-волокон [16].

Иттербиевые лазеры по длинам волн генерации в значительной степени подобны неодимовым. Однако благодаря отсутствию поглощения с возбуждённых уровней (эффект, при котором возбуждённые энергетические уровни не только усиливают вынужденное излучение, но и поглощают излучение накачки, переходя на более высокий энергетический уровень [3]) легирование ионами иттербия позволяет получить бóльшую мощность. Верхний предел на их излучаемую мощность определяет плотность излучения, которая, превышая 1 ГВт/см², может приводить к сильным нелинейным эффектам. Поэтому на практике ищется баланс между диаметром сердцевины, увеличение которого позволяет увеличить мощность накачки, и значением числовой апертуры, которая при этом уменьшается. 10-киловаттная мощность лазерной установки может потребовать диаметр сердцевины, равный 100 мкм, и внутреннюю оболочку (волновод накачки) диаметром в 1 мм, что не очень удобно. Одним из оригинальных решений для лазеров подобной мощности было изготовление волокна, в котором легированная сердцевина скручена в спираль.

Волоконные лазеры, использующие эрбиевое волокно (иногда с примесями Yb₂O₃ для сенсбилизации), позволяют получать генерацию как в видимом, так и в инфракрасном диапазоне. Для их накачки применяются GaAs-полупроводниковые и Nd:YAG лазеры. Они наиболее эффективны при накачке на длинах волн 0,95 мкм

или 1,48 мкм, где отсутствует поглощение с возбуждённых уровней. Преимуществом эрбиевых лазеров является возможность перестройки длины волны в широком диапазоне, что также используется для уменьшения спектральной ширины линии генерации. С помощью связанных резонаторов был создан лазер, способный генерировать излучение на двух различных длинах волн с шириной каждой из них в 16 кГц [3].

Генерация наносекундных импульсов

Для получения мощных наносекундных импульсов с частотой следования в единицы и десятки килогерц часто применяется модуляция добротности (англ. *Q-switching*). Используя её волоконные лазеры способны генерировать излучение с энергией порядка 1 мДж в импульсе с пиковой мощностью более 100 кВт [3].

Модуляция добротности на практике может достигаться различными способами. Внутррезонаторные акустооптические модуляторы были использованы ещё в середине 1980-х, а к концу 1990-х стали применяться эрбиевые волоконные лазеры с длиной активного волокна до 79 см и площадью мод

$$S_{\text{mode}} = \frac{(\int |E|^2 dS)^2}{\int |E|^4 dS} \sim 300 \text{ мкм}^2$$

работающие с помощью задающих генераторов (англ. *master oscillator power amplifier, MOPA*) [3].

Нелинейные процессы во время рассеяния Рамана или Манделъштама–Бриллюэна, которые приводили к самомодуляции добротности обычного (не легированного) волокна, были известны довольно давно. В 1998 году была получена генерация импульсов длительностью 2 нс с помощью неодимового волоконного лазера, к которому было присоединено десятиметровое одномодовое волокно. Обратная волна Стокса заходила в резонатор лазера в виде коротких импульсов, что и приводило к необходимому режиму генерации. Через два года был продемонстрирован 4-метровый иттербиевый лазер, генерировавший импульсы длительностью

около 100 нс. Необходимо отметить, что на практике без дополнительных устройств стохастическая природа этих типов рассеяния приводит к нестабильности амплитуды генерации [3].

Генерация пико- и фемтосекундных импульсов

Обычным методом получения пико- и фемтосекундных лазерных импульсов является синхронизация мод. В волоконном лазере одновременно может излучаться большое количество продольных мод с частотным расстоянием между ними $\Delta\nu = c/L_{opt}$, где L_{opt} – оптическая длина пути за один проход резонатора. О синхронизации мод говорят в том случае, когда между любыми соседними модами возникает одна и та же разница в фазе φ . Тогда интенсивность излучения I будет пропорциональна функции, зависящей от количества связанных мод M и разницы частот между ними:

$$I \sim \frac{\sin^2[(2M + 1)\pi\Delta\nu t + \varphi/2]}{\sin^2[\pi\Delta\nu t + \varphi/2]}$$

Результатом является испускание лазером последовательности импульсов длительностью $\tau_p = \frac{1}{(2M+1)\Delta\nu}$ с промежутком $\tau_i = \frac{1}{\Delta\nu}$ между ними [3].

В волоконных лазерах используют несколько типов синхронизации мод. Активная синхронизация заключается в модуляции оптического поля по амплитуде или фазе. Для волоконных лазеров приемлемыми по габаритам и потерям при подключении к волоконным приборам являются LiNbO_3 -электрооптические модуляторы. Длительность импульсов и промежутки между ними определяются конструкцией резонатора. Так, в кольцевом резонаторе с подключенным к нему обычным волокном длиной 2 км с сильной аномальной дисперсией можно получить длительность импульса около 4 пс. Резонатор Фабри–Перо позволяет достичь длительностей $\tau_p < 2$ пс. Существуют приборы, позволяющие получать импульсы длительностью до 10 пс при частоте их следования до 10 ГГц. Однако общей проблемой лазеров подобного типа является неустойчивость амплитуды импульсов при длительном периоде генерации. В полностью

волоконной конструкции, применяющей активную синхронизацию мод, используется взаимная фазовая модуляция [5].

Для получения фемтосекундных импульсов используется пассивная синхронизация мод. В этом случае используется некоторый нелинейный элемент, при прохождении которого импульс становится уже. В роли нелинейных элементов могут выступать так называемые насыщаемые поглотители, нелинейные зеркала типа волоконной петли и др. Идея использования насыщаемого поглотителя состоит в том, что при распространении импульса через такой прибор его края поглощаются существенно сильнее, чем центр (амплитуда которого намного больше). Это эквивалентно уменьшению длительности импульса. Существуют образцы лазеров, использующих насыщаемые поглотители для генерации импульсов длительностью 320 фс. Нелинейные зеркала или нелинейное вращение поляризации позволяют создать полностью волоконную конструкцию [5].

Однополяризационные лазеры

Даже в одномодовом волокне существует связь между модами с близкими постоянными распространения и ортогональными поляризациями (рис. 20). Для волоконно-оптических линий связи это является фактором, ограничивающим пропускную способность и длину, так как предпочтительным является сохранение поляризации при распространении импульса по волокну [5].



Рис. 20. Одномодовый иттербиевый лазер мощностью 10 кВт

Поляризация излучения волоконного лазера в общем случае нелинейным образом зависит от многих факторов, в частности, от мощности накачки. Часто используемым методом подавления одной из ортогональных поляризаций является применение внутри-волоконного поляризатора. В его роли выступает металлическая нить определённого сечения (например, в форме латинской буквы D), встроенная в волокно и протянутая вдоль его сердцевины. Для поляризации, ортогональной к плоской поверхности D-образной нити, омические потери будут достаточно сильными, чтобы значительно понизить её интенсивность. Для создания другого типа волоконного поляризатора, основанного на том же физическом принципе, оптическое волокно обрабатывается таким образом, что на расстоянии порядка длины волны от сердцевины образуется полированная поверхность, на которую напыляется слой металла. Экспериментальные исследования описанных конструкций показывали разницу амплитуд поляризаций до 25 дБ в инфракрасном диапазоне при выходной мощности порядка нескольких милливольт и КПД около 25% [4].

Принципиально иной метод заключается в использовании оптических волокон с сильным двулучепреломлением мод. Это волокна, в которых искусственно создана асимметрия канала распространения света, например, путём создания эллиптической сердцевины или боковых выемок, вызывающих механические напряжения в волокне в определённом направлении. В них моды с различной поляризацией имеют различные постоянные распространения. Генерации необходимой поляризации добиваются использованием внутриволоконных брэгговских решёток, в которых коэффициент отражения зависит от поляризации для резонатора Фабри–Перо [4-5].

Up–конверсия

Up–конверсионными (ап–конверсионными) называют лазеры, в которых длина волны излучения меньше, чем длина волны накачки (в большинстве обычных лазеров, накачиваемых светом,

реализуется противоположная ситуация). Ур–конверсионная схема накачки заключается в поглощении активной средой нескольких фотонов, вследствие чего энергия перехода с конечного энергетического уровня превышает энергию каждого из поглощённых фотонов. В волоконных лазерах её применение часто требует использования флюоридных волокон (ZBLAN). Ур–конверсия используется в тулий–, эрбий– и празеодим/иттербий–легированных лазерах [5]. Необходимо отметить, что каждый энергетический уровень иона, используемого для генерации, является уширенным вследствие взаимодействия с матрицей. Ур–конверсия представляет значительный интерес, так как позволяет создавать лазеры, работающие в синей области спектра при использовании накачки в красном или инфракрасном диапазоне.

Типичная схема накачки тулиевого активного волокна (активными центрами являются ионы Tm^{3+}) при трёхфотонном поглощении фотонов 1,06 мкм заключается в переходах $H = \pi r^2$ ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_5$, ${}^3F_4 \rightarrow {}^3F_2$, ${}^3H_4 \rightarrow {}^1G_4$. Промежуточные переходы ${}^3H_5 \rightarrow {}^3F_4$ и ${}^3F_2 \rightarrow {}^3H_4$ являются релаксационными. Результатом является генерация мощного излучения на длине волны 475 нм на переходе ${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_6$. Двухфотонное поглощение квантов с длиной волны 660 нм приводит к переходам ${}^3H_6 \rightarrow {}^3F_{2,3}$ и ${}^3H_4 \rightarrow {}^1D_2$ с последующим излучением кванта света 460 нм [5].

Празеодим представляет значительный интерес в качестве рабочего иона, так как Ур–конверсионная схема для волокон, легированных им, позволяет получать генерацию красного, оранжевого, зелёного и синего цветов. Часто применяется дополнительное легирование иттербием, благодаря очень широкой полосе поглощения, лежащей в диапазоне работы мощных GaAs диодов. Ионы Yt^{3+} служат в качестве сенсбилизаторов (частиц, передающих энергию между различными уровнями ионов, служащих для генерации) [4].

ВКР–лазеры

Преобразование частоты генерации лазера может быть осуществлено с помощью вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР, эффект Рамана). В стёклах оно проявляется существенно слабее, чем в некоторых нелинейных кристаллах и жидкостях, но благодаря низким оптическим потерям в оптическом волокне, ВКР происходит достаточно эффективно для практического использования. Впервые эффект Рамана в волоконных лазерах был продемонстрирован Роджером Столеном в 1972 г. и с тех пор продолжается активная разработка волоконных ВКР–лазеров. Они представляют значительный интерес благодаря переносу частоты генерации в инфракрасную область спектра, где редкоземельные твердотельные лазеры малоэффективны [6]. Вместе с дисперсионными резонаторами можно получить перестройку частоты в них в диапазоне 1,1–1,6 мкм при сохранении высокой выходной мощности [4].

Резонаторы волоконных ВКР–лазеров создаются парами брэгговских решёток, которые рассчитываются на полное пропускание излучения накачки и заметное отражение на длине волны стоксовой компоненты рассеянного излучения (порядка 99,9% для полностью отражающего зеркала и 5% для выходного зеркала). Иногда используют несколько пар решёток для получения сток-совых компонент более высоких порядков [5-6]. Наиболее распространёнными являются ВКР–лазеры, использующие германо-силикатные волокна, благодаря тому, что в них эффективность вынужденного комбинационного рассеяния и фоточувствительность существенно выше, чем в чисто кварцевых волокнах, и растёт с повышением концентрации германия. Типичный лазер непрерывной генерации накачивается другим YAG:Nd³⁺–лазером на длине волны 1,06 мкм. Первичная накачка неодимового лазера осуществляется полупроводниковыми диодами. Длина активного волокна может составлять 800 м. Резонаторы в нём создаются тремя и более парами (каскадами) брэгговских решёток. Подобный пяти-каскадный лазер с

длиной волны 1,48 мкм даёт выходную мощность 1,5 Вт и используется для накачки волоконных усилителей в ВОЛС [5].

Волоконные лазеры на фотонных кристаллах

Так называемое микроструктурированное или фотонно-кристаллическое оптическое волокно (ФКОВ, англ. *photonic crystal fiber (PCF), holey fiber, или microstructured fiber*) значительно отличается от традиционно применяемых оптических волокон. Если в последних световод образуется слоями с различным показателем преломления, то во ФКОВ светопередающая структура образуется воздушными каналами (например, цилиндрической формы), окружающими сплошную (или полую) сердцевину волокна – они образуют двумерный фотонный кристалл. Поэтому волноводные моды в них формируются не путём внутреннего отражения луча при распространении вдоль волокна, а вследствие появления запрещённых зон в спектре пропускания микроструктуры [5].

В типичном ФКОВ микроструктура образуется гексагонально упакованными воздушными каналами (англ. *triangular cladding single-core PCF*). Главной особенностью такого волокна является поддержка только основной моды независимо от длины волны или диаметра сердцевины. Поэтому микроструктуры позволяют создавать оптическое волокно с любой заданной числовой апертурой (от очень маленьких для активной сердцевины до очень больших для волноводов накачки) при сравнительно очень большом диаметре сердцевины [16]. Последнее очень важно для создания высокомошных одномодовых лазеров, так как обычная технология изготовления волокна требует увеличения диаметра сердцевины для повышения мощности, а для одной и той же волны генерации это приводит к многомодовому режиму распространения света.

Для накачки редкоземельных ионов в срезе ФКОВ создаётся структура, напоминающая оптическое волокно с двойным покрытием. Вокруг внутреннего фотонного кристалла, окружающего активную сердцевину, на некотором расстоянии формируется ещё один слой воздушных каналов (типично вытянутых в срезе волокна в радиальном

направлении). Преимуществом такой структуры кроме большой численной апертуры являются низкие потери излучения накачки благодаря отсутствию спиральных и винтовых мод, которые не проходят через активную сердцевину [16].

В 2003 году был продемонстрирован волоконный лазер в режиме постоянной генерации, использующий ФКОВ длиной 2,3 м, КПД которого было 78% при максимальной мощности генерации 80 Вт. В 2006 году был создан лазер с тем же КПД, максимальной мощностью генерации 320 Вт (550 Вт/м активного волокна) и площадью мод 2000 мкм². Как и в случае обычного волокна, лазеры, использующие ФКОВ, характеризуются линейной зависимостью выходной мощности излучения от мощности накачки [17].

ПРИМЕНЕНИЕ

Преимущества и недостатки

К преимуществам волоконных лазеров традиционно относят значительное отношение площади резонатора к его объёму, что обеспечивает качественное охлаждение, термостойкость кремния и небольшие размеры приборов в подобных классах требований по мощности и качеству. Лазерный луч, как правило, необходимо завести в оптическое волокно для последующего использования в технике. Для лазеров иной конструкции это требует специальных оптических систем коллимации и делает устройства чувствительными к вибрациям. В волоконных лазерах генерация излучения происходит непосредственно в волокне, и оно имеет высокое оптическое качество. Недостатками данного типа лазеров являются опасность возникновения нелинейных эффектов из-за высокой плотности излучения в волокне и сравнительно небольшая выходная энергия в импульсе, обусловленная малым объёмом активного вещества.

Волоконные лазеры проигрывают твердотельным в сферах применения, где требуется высокая стабильность поляризации, а использование сохраняющего поляризацию волокна затруднено по различным причинам. Твердотельные лазеры не могут быть заменены волоконными в спектральном диапазоне 0,7–1,0 мкм.

Они также имеют большой потенциал для наращивания выходной мощности импульса по сравнению с волоконными. Однако волоконные лазеры показывают хорошие результаты на длинах волн, где не существует достаточно хороших активных сред или зеркал для лазеров иных конструкций, и позволяют с меньшими сложностями реализовывать некоторые лазерные схемы наподобие пре-конверсии.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Рассчитать плотность мощности лазерного излучения, при котором начинается активное испарение локальных участков поверхности стали.

Плотность мощности рассчитывается по формуле

$$J = \frac{4P}{\pi \tau \nu d^2},$$

где P – мощность излучения, определяемая по таблице исходя из установленных значений мощности накачки,

τ – длительность импульса, $\tau = 100$ нс,

$d = 30$ мкм – диаметр луча в фокусе,

ν – частота генерации импульсов.

УКАЗАНИЕ: провести вычисления для частот 20, 40, 60, 80, 100 кГц.

Таблица 2. Фактическая мощность при разной мощности накачки.

Мощность накачки, %	Фактическая мощность, Вт
1	0,14
2	0,2
4	0,21
10	0,48
15	2,61
20	4,5
40	17,9
60	30,5
100	56,2

Задание 2. Исследование распределения мощности излучения по диаметру луча лазера.

1. Собрать установку, согласно рис. 21. Установить фильтр.
2. Провести измерения показания измерителя мощности от координаты щели датчика.
3. Построить график зависимости. Выполнить аппроксимацию экспериментальных точек кривой, соответствующей распределению Гаусса $I = I_0 \exp[-\alpha x^2]$.
4. Определить показатель степени экспоненты α .
5. По показателю степени определить диаметр луча лазера.

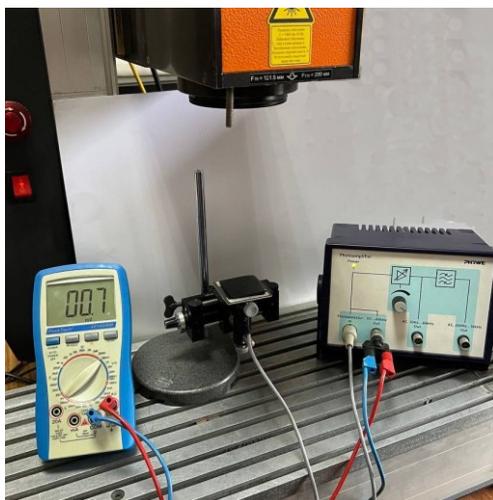


Рис. 21. Внешний вид экспериментальной установки

Описание метода

Для определения распределения интенсивности по сечению лазерного луча на фотоэлемент располагаем оптическую щель, размеры которой много меньше размеров рабочей области фотоэлемента и, перемещая его микрометрическим винтом перпендикулярно к направлению распространения излучения, локально измеряем интенсивность по сечению лазерного луча.

Показания амперметра зависят от силы фототока датчика, а она в свою очередь определяется энергией лазерного излучения,

падающей на датчик. Энергия, падающая в единицу времени пропорциональна силе тока $\delta\varepsilon \sim \delta J$. Показания амперметра по измерению фототока датчика вычислим, предполагая, что элементарная сила тока от малого участка поверхности площадью dS фотодатчика равна:

$$\delta J = k\delta P, \quad (1)$$

где k – коэффициент преобразования мощности в фототок, $\delta P = IdS$ – мощность излучения, I – интенсивность волны, тогда:

$$\delta J = kIdS. \quad (2)$$

Полная сила тока фотодатчика от всей активной его поверхности равна:

$$J = \int \delta J = \int_{-\infty}^{+\infty} kIdS, \quad (3)$$

так как распределение интенсивности по сечению лазерного луча соответствует распределению Гаусса, учитывая приближение, что ширина щели фотодатчика b много меньше диаметра лазерного луча ($b \ll d$), интегрируя (рис. 22) по координате x , которая задает расположение области датчика ограниченной щелью, при постоянном значении y определяемой микрометрическим винтом в эксперименте, запишем:

$$J = 2kb \int_0^{d/2} I_0 e^{-\alpha(x^2+y^2)} dx, \quad (4)$$

где b – ширина входной щели фотодатчика, d – диаметр луча, I_0 – интенсивность в центре лазерного пучка.

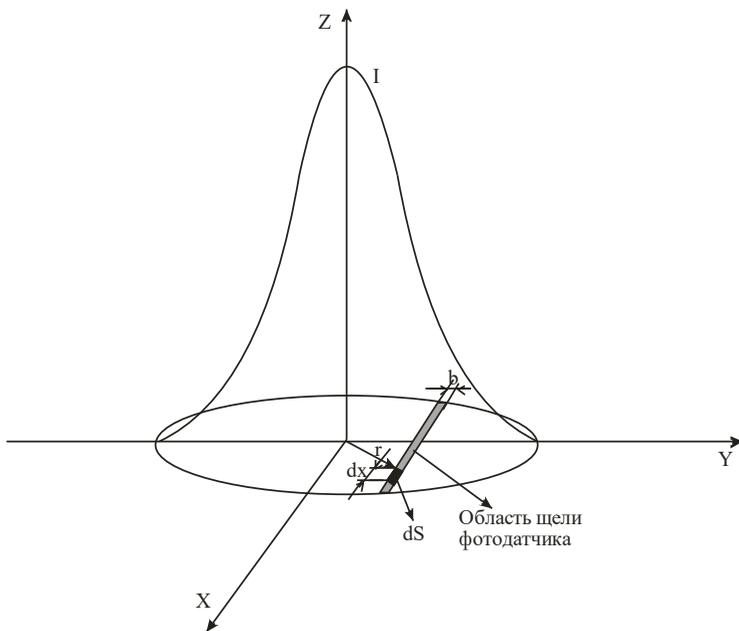


Рис. 22. К расчету интенсивности

По известной фактической мощности лазера вычисляется интенсивность лазерного пучка в центре. Выражение для мощности с учетом распределение Гаусса запишем в виде:

$$P_L = I_0 \int_0^{d/2} e^{-ar^2} 2\pi r dr, \quad (5)$$

где r – расстояние от центра луча до области фотодатчика $dS = bdx$, откуда получаем уравнение для определения I_0 :

$$I_0 = \frac{P}{\int_0^{d/2} e^{-ar^2} 2\pi r dr}. \quad (6)$$

Используя уравнение (6) и (4) определяется сила тока фотодатчика через интенсивность лазерного излучения:

$$J = 2kb \left(\frac{P_L}{\int_0^{d/2} e^{-\alpha r^2} 2\pi r dr} \right) \cdot \int_0^{d/2} e^{-\alpha(x^2+y^2)} dx. \quad (7)$$

Согласно выражению (7), регистрируя ток фотодатчика с координатой y можно определить коэффициент преобразования фототока в мощность $k = 6,29 \cdot 10^6 \text{ A/Vm}$, за счет измерения значений тока с шагом 0,05 мм по оси y . В формуле для определения силы тока коэффициент $\alpha = 2,95 \cdot 10^6 \text{ 1/m}^2$ определялся из экспериментальных данных по тарировке, представленных на рис. 23, как коэффициент в показателе Гауссовой экспоненты.

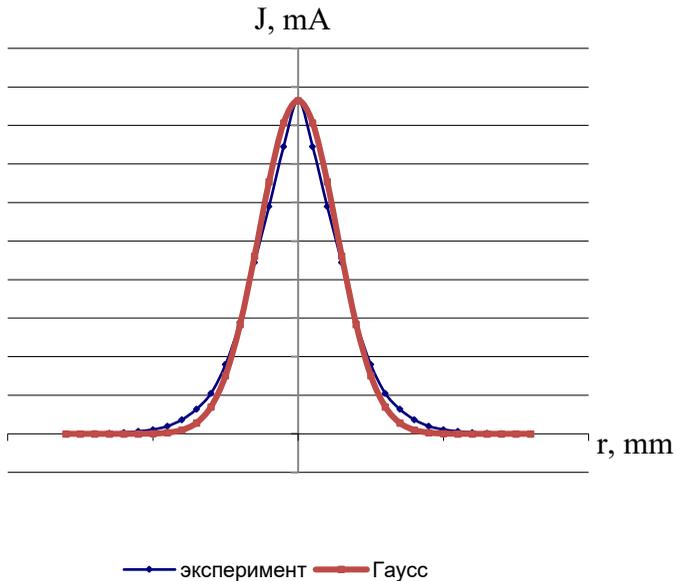


Рис. 23. Зависимость силы тока от координаты щели фотодатчика.

Таким образом, тарировка фотодатчика позволяет определить коэффициент перевода фототока в интенсивность лазерного излучения и распределение излучения по сечению луча лазера.

Лабораторная работа №3

**ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННОГО
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ CO₂ ЛАЗЕРА И РАБОТА
С ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКОЙ LDesigner C1**

Цели работы:

- а) ознакомление с конструкцией и элементами исследуемого CO₂ лазера с длиной волны 10,6 мкм;
- б) получение представления о методах и экспериментальной технике измерения расходимости лазерного излучения;
- в) привитие практических навыков работы с лазером LDesigner C1.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

1. Изучить принципы работы газовых лазеров на стр. 39–43 в учебном пособии [18].

Состав активной среды:

- Углекислый газ (CO₂) (10–20%)
- Азот (N₂) (10–20%)
- Водород (H₂) и/или ксенон (Xe) (несколько процентов)
- Гелий (He) (остальное)

Теория изучения расходимости лазерного излучения

По мере отдаления от лазерного источника поперечный размер сечения лазерного пучка изменяется (в большинстве случаев увеличивается). Одним из уникальных свойств лазера является возможность создания световых пучков с высокой направленностью или, как чаще принято говорить, с малой угловой расходимостью. Благодаря этому свойству возможна передача энергии (мощности) излучения на большие расстояния и достижение высокой степени освещённости объекта путём фокусировки света в пятно, соизмеримое с длиной волны.

В числе первоочередных факторов, способных оказать влияние на угловую расходимость, следует выделить:

- конфигурацию зеркал резонатора;

- количество генерируемых типов колебаний (одномодовость или многомодовость режима генерации излучения);
- оптические неоднородности (искажения), существующие во всех оптических элементах резонатора.

Сильно увеличить исходную расходимость «идеального» лазера могут также возникающие в результате работы излучателя термооптические и акустооптические возмущения активной среды.

Наиболее полной пространственно-энергетической характеристикой лазерного излучения является диаграмма направленности, т.е. плотность углового распределения энергии (мощности) в лазерном пучке. При изучении расходимости лазерного излучения принципиально важными являются два вопроса: какую минимальную расходимость пучка можно получить и при каких условиях измерения расходимости дают однозначный результат.

Так как вблизи излучающей апертуры лазера пространственное распределение имеет сложную конфигурацию, то в большинстве случаев практический интерес представляет измерение данной характеристики в так называемой дальней зоне (или зоне Фраунгофера), когда форма пучка перестаёт зависеть от расстояния и можно говорить о сформировавшейся (постоянной) диаграмме направленности излучения. В качестве приближённой оценки границы дальней зоны принимают расстояние, превышающее величину

$$d_0^2/\lambda \quad (1),$$

где d_0^2 – диаметр излучающей апертуры лазера; λ – длина волны излучения. Оно ещё имеет название дистанции Рэлея.

Ширину диаграммы направленности в дальней зоне количественно характеризуют углом расходимости лазерного излучения, который обычно нормируется при выпуске лазеров из производства. На практике используют два определения угла расходимости. В первом случае имеют в виду угловую расходимость, т.е. плоский или телесный угол, определяющий ширину диаграммы направленности в дальней зоне по заданному уровню углового распределения энергии (мощности), отнесённого к её макси-

мальному значению. Чаще всего значение такого уровня принимается равным 0,5 или e^{-2} , где e – основание натурального логарифма.

Приведённое выше определение однозначно характеризует излучение только одномодового лазера, имеющего диаграмму направленности, близкую к Гауссовскому распределению. В случае же многомодового режима диаграмма излучения имеет боковые «лепестки», содержащие значительную часть энергии (мощности). Поэтому здесь наиболее показательной характеристикой является энергетическая расходимость лазерного излучения, т.е. плоский или телесный угол, внутри которого распространяется заданная доля энергии (мощности) излучения.

Лазерное излучение также характеризуют значением диаметра пучка, т.е. размером поперечного сечения пучка лазерного излучения, внутри которого заключена заданная доля энергии (мощности). Но иногда здесь используется и другое определение, где под диаметром пучка понимается расстояние между двумя точками, в которых амплитуда или интенсивность поля уменьшается в некоторое число раз по сравнению с максимальным значением.

Для практического определения угла расходимости лазерного излучения используют три основных метода:

- метод сечений;
- метод регистрации диаграммы направленности;
- метод фокального пятна.

При методе сечений расходимость излучения определяют путём измерения в дальней зоне диаметров двух поперечных сечений пучка d_1 и d_2 , отстоящих друг от друга на расстоянии ΔL (см. рис. 24а), и последующего вычисления искомого угла Θ по формуле

$$\Theta = 2 \arctg \frac{d_2 - d_1}{2\Delta L} \quad (2)$$

Измерения параметров d_1 и d_2 производятся здесь по одному и тому же критерию, а именно: по заданному уровню интенсивности либо заданной доле энергии (мощности). Главным

достоинством такого метода является простота. Однако очень часто дальняя зона может находиться на значительном удалении от лазера (десятки метров и более), что затрудняет использование метода сечений в лабораторных условиях. Для уменьшения же линейных габаритов установки в данном случае обычно применяют различные зеркальные, призмённые или телескопические системы. Последние позволяют уменьшать размер светового пучка в m раз, где m – это кратность телескопа. Метод регистрации диаграммы направленности позволяет получить наиболее полную информацию о пространственном распределении лазерного излучения. Здесь для измерения обычно используется фотоприёмник, расположенный также в дальней зоне и закрытый диафрагмой с отверстием малого диаметра (см. рис. 24б). Перемещая его по дуге окружности радиусом R , регистрируют угловое распределение интенсивности излучения.

Зная диаграмму направленности, можно рассчитать энергетическую и угловую расходимость излучения. Измерение диаграммы направленности является сложной и трудоёмкой процедурой, поэтому редко применяется в метрологической практике. Метод фокального пятна является наиболее распространённым методом измерения расходимости. Как уже отмечалось выше, для проведения измерений в дальней зоне требуются, как правило, значительные расстояния от источника излучения. Условия же дифракции Фраунгофера можно также получить в фокальной плоскости идеальной безабберационной положительной линзы (рис. 24в). Для перехода здесь к угловой величине необходимо линейное распределение в фокальной плоскости d_f разделить на фокусное расстояние линзы f' :

$$\Theta \approx \frac{d_{f'}}{f'} \quad (3)$$

В этом методе для повышения точности необходимо использовать длиннофокусные линзы с апертурой, превышающей примерно в два раза диаметр падающего лазерного пучка. Это позволяет исключить влияние дифракции на краях линзы.

Погрешность измерения здесь связана в основном с неточностью определения размера пятна d_r .

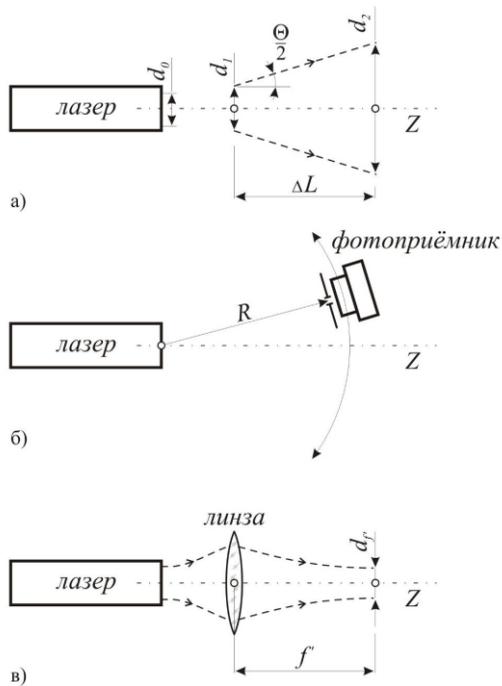


Рис. 24. Методы определения угла расходимости лазерного излучения

Порядок выполнения работы

Задание 1. Оценить, используя формулу 1, границу дальней зоны.

Задание 2. Методом измерения диаметра фокального пятна df' оценить угловую расходимость Θ .

Лабораторная работа № 4

ПРИМЕНЕНИЕ УФ-ЛАЗЕРА ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Цель работы:

а) Ознакомление с конструкцией и элементами исследуемого УФ-лазера с длиной волны 355 нм.

б) Исследование процесса лазерной абляции лакокрасочного покрытия с металлической пластины с использованием УФ-лазера.

в) Привитие практических навыков работы с лазером TORWATT UVM WP 10Вт JPT.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Лазерная абляция – это процесс удаления материала с поверхности под воздействием лазерного излучения. Этот метод широко применяется в различных областях науки и техники, включая микрообработку материалов, создание тонких пленок, очистку поверхностей и даже медицинские применения.

Лазерная абляция: физические основы

Лазерная абляция – это процесс удаления материала с поверхности под воздействием лазерного излучения. В случае УФ-лазеров, таких как TORWATT UVM WP 10Вт JPT, абляция происходит за счет фотохимических и фототермических процессов. Короткая длина волны УФ-лазера (355 нм) обеспечивает высокую энергию фотонов, что позволяет эффективно разрушать химические связи в материалах, вызывая их испарение или разложение. Это делает УФ-лазеры идеальными для точной обработки поверхностей без значительного теплового воздействия на подложку.

УФ-лазерный маркер TORWATT UVM WP 10Вт JPT

TORWATT UVM WP 10Вт JPT – это твердотельный УФ-лазерный маркер, который генерирует излучение с длиной волны 355 нм. Он используется для высокоточной маркировки, гравировки и удаления материалов, включая лакокрасочные покрытия, полимеры и тонкие металлические слои. Основные особенности лазера:

- Тип лазера: УФ-лазер с длиной волны 355 нм.
- Мощность: 10 Вт.
- Источник накачки: Лазерный диод.
- Режим работы: Импульсный с регулируемой частотой импульсов (до 100 кГц).
- Тип излучения: Поперечная мода TEM₀₀ (гауссов пучок).



Принцип работы УФ-лазера TORWATT UVM WP

Лазерный маркер TORWATT UVM WP 10Вт JPT представляет собой твердотельный лазер, генерирующий излучение в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне с длиной волны 355 нм. Его работа основана на сложном процессе преобразования инфракрасного (ИК) излучения в УФ-излучение с использованием нелинейной оптики. Рассмотрим этот процесс поэтапно.

Активная среда: кристалл Nd:YVO₄

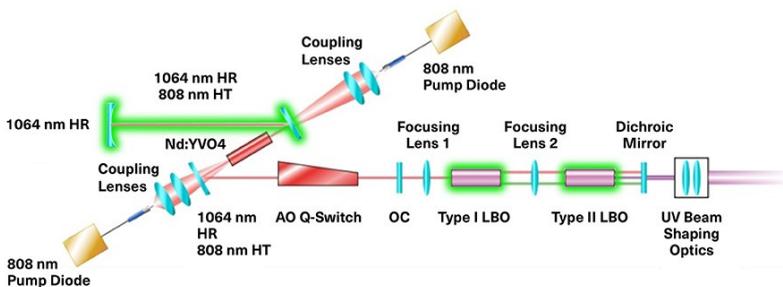
Основным элементом лазера является активная среда – кристалл Nd:YVO₄ (ванадат иттрия с неодимом). Этот кристалл обладает следующими особенностями:

- Высокий коэффициент поглощения: эффективно поглощает излучение лазерного диода накачки.
- Широкая полоса поглощения: позволяет использовать диодную накачку в широком диапазоне длин волн.
- Высокая эффективность преобразования: обеспечивает генерацию мощного ИК-излучения на длине волны 1064 нм.

Накачка активной среды

Накачка активной среды осуществляется с помощью лазерного диода, который излучает свет в ближнем инфракрасном диапазоне (обычно 808 нм). Этот свет поглощается кристаллом Nd:YVO₄, что приводит к возбуждению ионов неодима (Nd³⁺) и созданию инверсии населенностей – условия, необходимого для генерации лазерного излучения.

Генерация ИК-излучения (1064 нм)



При переходе ионов Nd³⁺ из возбужденного состояния в основное происходит испускание фотонов с длиной волны 1064 нм (инфракрасный диапазон). Этот процесс происходит внутри оптического резонатора, который состоит из двух зеркал:

- Полностью отражающее зеркало: отражает 100% излучения обратно в активную среду.

– Частично пропускающее зеркало: пропускает часть излучения, формируя выходной лазерный пучок.

Резонатор обеспечивает многократное прохождение света через активную среду, что усиливает излучение и формирует когерентный лазерный пучок.

Удвоение частоты (SHG): преобразование 1064 нм в 532 нм

Для получения излучения в видимом диапазоне используется процесс удвоения частоты (Second Harmonic Generation, SHG). Он реализуется с помощью нелинейного оптического кристалла, такого как КТР (титанил-фосфат калия).

Принцип работы:

– ИК-излучение с длиной волны 1064 нм проходит через кристалл КТР.

– За счет нелинейных оптических эффектов (например, генерации второй гармоники) излучение преобразуется в свет с длиной волны 532 нм (зеленый диапазон).

– КПД преобразования зависит от качества кристалла и точности настройки фазового синхронизма.

Утроение частоты (THG): преобразование 532 нм в 355 нм

Для получения УФ-излучения используется процесс утроения частоты (Third Harmonic Generation, THG). Он реализуется с помощью второго нелинейного кристалла, такого как ВВО (борат бария).

Принцип работы:

– Зеленое излучение с длиной волны 532 нм проходит через кристалл ВВО.

– За счет нелинейных оптических эффектов (например, генерации третьей гармоники) излучение преобразуется в свет с длиной волны 355 нм (УФ-диапазон).

– КПД преобразования ниже, чем у SHG, но достаточен для генерации мощного УФ-излучения.

Оптический резонатор и стабилизация мод

Оптический резонатор лазера TORWATT UVM WP настроен для работы в поперечной моде ТЕМ₀₀, которая характеризуется гауссовым распределением интенсивности излучения. Это обеспечивает:

- Высокую точность: Луч имеет минимальную расходимость и фокусируется в пятно малого диаметра.
- Стабильность: Продольные моды стабилизируются за счет точной настройки длины резонатора.

Оптический резонатор и брегговские зеркала

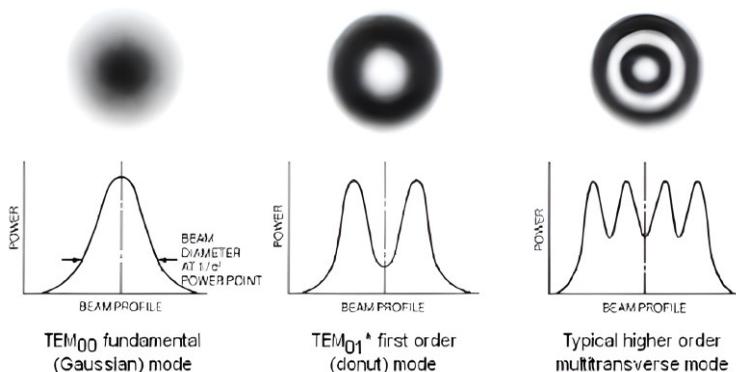
Оптический резонатор лазера TORWATT UVM WP состоит из двух зеркал:

- Полностью отражающее зеркало: отражает 100% излучения обратно в активную среду.
- Частично пропускающее зеркало: пропускает часть излучения, формируя выходной лазерный пучок.

Для повышения эффективности резонатора используются брегговские зеркала – многослойные диэлектрические структуры, которые обеспечивают высокий коэффициент отражения на длине волны 355 нм. Брегговские зеркала работают на основе интерференции света, отраженного от границ между слоями с разными показателями преломления.

Особенности мод УФ-лазера

Лазерный маркер TORWATT UVM WP 10Вт JPT работает в поперечной моде ТЕМ₀₀, которая является основной модой для большинства твердотельных лазеров. Эта мода характеризуется гауссовым распределением интенсивности излучения, что обеспечивает высокую точность и минимальное рассеяние энергии. Рассмотрим особенности мод более подробно.



Поперечные моды (TEM_{mn})

Поперечные моды определяют распределение интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка. Они обозначаются как TEM_{mn}, где:

m – количество нулей интенсивности по горизонтали.

n – количество нулей интенсивности по вертикали.

Для лазера TORWATT UVM WP используется основная мода TEM₀₀, которая имеет следующие характеристики:

- Гауссово распределение интенсивности: Интенсивность излучения максимальна в центре пучка и плавно уменьшается к краям.

- Минимальная расходимость: Луч сохраняет свою форму на больших расстояниях, что важно для точной обработки материалов.

- Высокая энергетическая плотность: в центре пучка сосредоточена основная часть энергии, что позволяет эффективно удалять материал.

Продольные моды

Продольные моды определяются длиной оптического резонатора и связаны с интерференцией света внутри резонатора. Они характеризуются:

- Частотным интервалом: Расстояние между модами определяется формулой:

$\Delta\nu = c/2L$, где c – скорость света, L – длина резонатора.

– Монохроматичностью: для стабильной работы лазера важно поддерживать одну или несколько продольных мод.

В лазере TORWATT UVM WP продольные моды стабилизируются за счет точной настройки длины резонатора и использования брегговских зеркал.

Преимущества моды TEM₀₀

Работа в моде TEM₀₀ обеспечивает следующие преимущества:

– Высокая точность обработки: Гауссов пучок фокусируется в пятно малого диаметра (до нескольких микрон), что позволяет выполнять микрообработку с высокой точностью.

– Минимальное тепловое воздействие: Энергия сосредоточена в центре пучка, что минимизирует тепловое воздействие на окружающие области.

– Резкие границы обрабатываемой области: благодаря гауссову распределению, границы обрабатываемой области четкие и хорошо определенные.

Подавление высших мод

Для обеспечения работы в моде TEM₀₀ необходимо подавлять высшие моды (например, TEM₁₀, TEM₀₁, TEM₁₁). Это достигается за счет:

– Точной настройки резонатора: Длина резонатора и положение зеркал подбираются так, чтобы усиливалась только мода TEM₀₀.

– Использования диафрагм: внутри резонатора могут устанавливаться диафрагмы, которые блокируют высшие моды.

– Качества активной среды: Однородность кристалла Nd:YVO₄ и его точная юстировка также способствуют подавлению высших мод.

Влияние мод на процесс абляции

Режим TEM₀₀ особенно важен для лазерной абляции, так как он обеспечивает:

– Равномерное удаление материала: Гауссово распределение интенсивности позволяет равномерно удалять материал с поверхности.

– Минимальные повреждения подложки: Энергия сосредоточена в центре пучка, что минимизирует риск повреждения подложки.

– Высокую повторяемость: благодаря стабильности моды TEM₀₀, результаты обработки хорошо воспроизводятся.

Параметры лазерного излучения

Мощность: Мощность лазера определяет количество энергии, передаваемое материалу за единицу времени. Измеряется в ваттах (Вт).

Частота импульсов: Частота импульсов определяет количество лазерных импульсов в секунду. Измеряется в герцах (Гц) или килогерцах (кГц).

Скорость сканирования: Скорость сканирования определяет, как быстро лазерный луч перемещается по поверхности. Измеряется в миллиметрах в секунду (мм/с).

Длительность импульса: Длительность импульса определяет время, в течение которого лазерный импульс воздействует на материал. Измеряется в наносекундах (нс).

Фокусное расстояние и диаметр пятна: Фокусное расстояние объектива определяет диаметр пятна лазерного луча на поверхности. Чем меньше диаметр пятна, тем выше энергетическая плотность.

Энергия импульса: Энергия импульса определяет количество энергии, передаваемое материалом за один импульс. Зависит от мощности и частоты импульсов.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Подготовка образцов.

– Очистить поверхность металлической пластины от загрязнений с помощью спирта или ацетона.

– Нанести лакокрасочное покрытие равномерным слоем на поверхность пластины.

– Измерить начальную массу образца с помощью высокоточных весов.

Задание 2. Настройка параметров лазера.

– Установить мощность лазера (напр., 30%, 50%, 70% от максимальной).

– Задать скорость сканирования (напр., 100 мм/с, 200 мм/с, 300 мм/с).

– Задать частоту импульсов (напр., 20 кГц, 30 кГц, 40 кГц).

Задание 3. Проведение абляции.

– Постепенно удалить лакокрасочное покрытие с поверхности пластины при помощи лазерного излучения.

– Зафиксировать время полного удаления лакокрасочного покрытия.

В работе требуется провести нескольких экспериментов с разными параметрами для сравнения результатов.

Задание 4. Анализ результатов.

– Измерение массы образца после абляции для определения количества удаленного материала.

– Исследование поверхности под микроскопом для оценки качества обработки (отсутствие повреждений подложки, равномерность удаления покрытия).

– Запись и анализ данных (например, зависимость массы удаленного материала от мощности лазера).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вудс, С. Волоконные лазеры средней мощности и их применение / Вудс С., Дака М., Флин Г. // Фотоника, 2008. – вып. 4. – С. 6–10.
2. Agrawal, G.P. Applications of nonlinear fiber optics / G. P. Agrawal – San Diego : Academic Press, 2001. – 458 p.
3. Agrawal, G.P. Applications of nonlinear fiber optics. – 2nd ed. – San Diego : Academic Press, 2008. – Vol. 10. – 508 p.
4. Dignonnet, M.J.F. Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers. – 2nd ed. – New York : Marcel Dekker, Inc., 2001. – 792 p.
5. Григоруку, В.І. Нелінійні та лазерні процеси в оптичних волокнах / В.І. Григоруку, П.А. Коротков, Г.С. Фелінський. – Киев : Київський університет, 2008. – 576 с.
6. Дианов, Е.М. Волоконные лазеры / Е.М. Дианов // Успехи физических наук / под ред. В.А. Рубаков – Москва : ФИАН, 2004. – Т. 174, вып. 10. – С. 1139–1142.
7. Дианов, Е. М. Лазеры и волоконная оптика / Е.М. Дианов, А.М. Прохоров // Успехи физических наук / под ред. В.А. Рубаков – Москва : ФИАН, 1986. – Т. 148, вып. 2. – С. 289–311.
8. Курков, А.С. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности / А.С. Курков, Е.М. Дианов // Квантовая электроника – 2004. – Т. 34, вып. 10. – С. 881–900.
9. Hayes J. Fiber Optics Technician's Manual. 2th Edition. / J. Hayes – Australia : Delmar Cengage Learning, 2000. – 242 p.
10. Koester, C.J. Amplification in a Fiber Laser / C.J. Koester, E. Snitzer // Applied Optics – Optica. – 1964. – Vol. 3, Iss. 10. – P. 1182–1186.
11. Gan, F. Photonic glasses / F. Gan, Xu Lei / Singapore – World Scientific, 2006. – 447 p.
12. Скляр, О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учеб. пособие. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2010. – 272 с.

13. Yla-Jarkko, K.H. Low-noise intelligent cladding-pumped L-band EDFA / K.H. Yla-Jarkko, C.A. Codemard, J. Singleton, P.W. Turner, I. Godfrey, S. Alam, J. Nilsson, J.K. Sahu // IEEE Photonics Technology Letters. 2003. – Vol. 15, Iss. 7. – P. 909–911.

14. Goure, J.-P. Optical fibre devices / Goure J.-P., Verrier I. – Boca Raton : CRC Press 2001. – 269 p.

15. Васильев, С.А. Волоконные решётки показателя преломления и их применения / С.А. Васильев, О.И. Медведков, И.Г. Королёв, А.С. Божков, А.С. Курков, Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 12. – С. 1085–1103.

16. Желтиков, А. М. Микроструктурированные световоды для нового поколения волоконно-оптических источников и преобразователей световых импульсов // Успехи физических наук / под ред. В.А. Рубаков – Москва : ФИАН, 2007. – Т. 177, вып. 7. – С. 737–762.

17. Limpert, J. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser / J. Limpert, T. Schreiber, S. Nolte, H. Zellmer, T. Tunnermann, R. Iliew, F. Lederer, J. Broeng, G. Vienne, A. Petersson et al. // Optics Express – Optica, 2003. – Vol. 11, Iss. 7. – P. 818–823.

18. Харанжевский Е.В. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество / Е.В. Харанжевский, М.Д. Кривилёв – Ижевск : Удмуртский университет, 2011 – 188 с.

Учебное издание

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ЛАЗЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Учебно-методическое пособие

Составители:

Писарева Татьяна Александровна
Смирнов Илья Владимирович
Харанжевский Евгений Викторович

Авторская редакция

Подписано в печать 02.06.25. Формат 60 x 84 1/16.

Усл. печ. л. 4,2. Уч.-изд. л. 3,7.

Тираж 300 экз. Заказ 1025.

Издательский центр «Удмуртский университет»
426034, г. Ижевск, ул. Ломоносова, 4Б, каб. 021
Тел.: + 7 (3412) 916–364, E-mail: editorial@udsu.ru

Типография Издательского центра «Удмуртский университет»
426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1, корп. 2.
Тел.: + 7 (3412) 68–57–18