



**О.Б. Ковалев
В.М. Фомин**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ
ТОЛСТЫХ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

О.Б. Ковалев, В.М. Фомин

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ ТОЛСТЫХ
ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2013

УДК 621.9
ББК 34.63.1
К 56



*Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 12-08-07111,
не подлежит продаже*

Ковалев О.Б., Фомин В.М. **Физические основы лазерной резки толстых листовых материалов.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 256 с. — ISBN 978-5-9221-1520-9.

В монографии представлены обобщенные результаты теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия лазерного излучения с металлами при лазерной резке листовых материалов. Внимание уделено построению физико-математических моделей с учетом многообразия теплофизических процессов, главными из которых являются нагрев, плавление и удаление продуктов газовой струей. Предложена вычислительная технология моделирования пространственных струйных течений рабочего газа, имеющих место при лазерной резке толстолистовых материалов. Представлены оригинальные результаты наблюдения и визуализации процессов внутри лазерного реза в лабораторных условиях. Описаны результаты экспериментальных исследований, выполненных на автоматизированном лазерном технологическом комплексе ИТПМ СО РАН по лазерной резке толстых листов нержавеющей, малоуглеродистой сталей и титана.

Для специалистов в области лазерной обработки конструкционных материалов, а также для аспирантов, магистрантов и студентов университетов.

ISBN 978-5-9221-1520-9

© ФИЗМАТЛИТ, 2013

© О. Б. Ковалев, В. М. Фомин, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
--------------------	---

Г Л А В А 1

МОЩНЫЕ ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ НА ИХ ОСНОВЕ

1.1. Физические основы мощных технологических лазеров	11
1.2. Типы промышленных лазеров и области их применения	17
1.3. Технологические процессы лазерной обработки материалов	30
1.4. Автоматизированные лазерные технологические комплексы для обработки материалов	36

Г Л А В А 2

ТЕОРИЯ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

2.1. Особенности лазерной резки конструкционных материалов на авто- матизированных установках	47
2.2. Процессы, сопровождающие лазерную резку материалов, простейшие оценки и балансовые соотношения	53
2.3. Сопреженные задачи МСС при взаимодействии лазерного излучения с поверхностью материала	58
2.4. Исследование влияния характеристик лазерного излучения на форму и глубину разрушения поверхности при лазерном воздействии	70
2.5. Численный анализ влияния многократного отражения и поглощения лазерного излучения на форму поверхности разрушаемого материала	82

Г Л А В А 3

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ МЕТАЛЛОВ

3.1. Проблемы газовой динамики лазерной резки толстолистовых материалов	91
3.2. Математическая постановка задачи для внешнего и внутреннего течений газа, полные трехмерные уравнения Навье–Стокса	96
3.3. Метод численного решения и описание алгоритма	100
3.4. Тестовые расчеты	104

Г Л А В А 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ДИНАМИКИ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА ВНУТРИ УЗКОГО КАНАЛА

4.1. Методы диагностики газовых потоков и постановка задачи их регистрации	110
4.2. Лабораторная модельная установка и методика визуализации течений газа в канале геометрически подобном лазерному резу	115
4.3. Визуализация сверхзвуковых и дозвуковых течений газа в узком плоском канале	119

Г Л А В А 5

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ
ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ И РАБОЧИХ ГАЗОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ
МЕТАЛЛОВ**

5.1. Отрывные течения нейтрального или инертного газа применительно к резке нержавеющей стали	125
5.2. Дозвуковые течения активного газа кислорода применительно к лазерной резке низколегированной стали	134
5.3. Газодинамика гибридной кислородной резки с поддержкой лазерного излучения	141
5.4. Параметризация гибридной кислородно-лазерной резки толстолистовой стали	152

Г Л А В А 6

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ
НА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ**

6.1. Описание общего подхода к лабораторному моделированию и прямой регистрации процессов в канале лазерного реза	164
6.2. Визуализации процессов плавления, течения и удаления расплава парафина внутри плоского канала	171
6.3. Модели течения и разрушения жидкой пленки с образованием капель	176
6.4. Визуализация лазерной резки легкоплавкого сплава Розе	180

Г Л А В А 7

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОКИСЛЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ
КИСЛОРОДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ И
НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

7.1. Лазерно-индуцированное горение железа в потоке кислорода и образование шероховатости	197
7.2. Физико-химическая модель окисления конструкционной стали под действием лазерного излучения	202
7.3. Анализ наблюдаемых закономерностей образования шероховатости при лазерной резке малоуглеродистой стали с кислородом	215

Г Л А В А 8

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
ШЕРОХОВАТОСТИ ЗА СЧЕТ ЦИКЛОВ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО
ГОРЕНИЯ ЖЕЛЕЗА В ПОТОКЕ КИСЛОРОДА**

8.1. Основные уравнения и математическая постановка задачи	220
8.2. Разностный метод решения и описание алгоритма	227
8.3. Численное моделирование образования борозд шероховатости при кислородной лазерной резке малоуглеродистой стали	229
Основные условные обозначения	240
Список литературы	244

ВВЕДЕНИЕ

Использование созданных за последнее время мощных CO_2 -лазеров и появление на их основе автоматизированных лазерных технологических комплексов по раскрою различных материалов, в том числе и толстолистовых, поставило ряд новых задач, касающихся качества поверхности реза, скорости и эффективности резки при использовании различных вспомогательных газов. Современные лазеры с высоким уровнем контроля качества излучения позволяют обеспечить высокую точность, локальность действия, необходимую скорость и качество обработки материалов.

Авторы данной работы концентрируют своё внимание на физических процессах лазерного взаимодействия с материалами, понимание роли которых, достигается путем объединения усилий в области математического и численного моделирования, лабораторной физической имитации и проведения полномасштабных натурных экспериментов.

Газолазерная резка — широко распространенная технология лазерного раскроя материалов, теоретическому и экспериментальному исследованию которой посвящено большое количество оригинальных статей и монографий. Существующее в мире оборудование имеет устойчивые режимы лазерной резки только для тонких листовых материалов, которые достаточно хорошо изучены и отработаны, как правило, опытным путем. С появлением более мощных CO_2 - и волоконных лазеров возникает острая необходимость в расчетно-экспериментальном исследовании процессов газолазерной резки для целенаправленного выбора характеристик излучения с учетом: толщины и свойств обрабатываемого материала, сопутствующего газа и термодинамических параметров его истечения. Сложность физической картины процесса, а также потребности практики в настоящее время поддерживают высокую активность исследований в этом направлении.

В настоящее время опубликовано несколько монографий, в которых в разной мере обобщены и проанализированы вопросы, связанные с проблемами лазерной резки материалов [1–7]. Однако многообразие физических процессов и явлений, протекающих при высоких температурах, характерных для лазерной резки, затрудняет экспериментальную отработку рациональных режимов. Удовлетворительное математическое описание процессов, сопровождающих резку металлов, в настоящее время отсутствует. Объясняется это

необходимостью включать в рассмотрение большое количество сопряженных задач механики сплошных сред и физики лазерного излучения, к которым относятся: канально-щелевое струйное течение сопутствующего газа; неустойчивое течение пленки расплава, образование волн на поверхности, обусловленное силовым воздействием газа; теплоперенос за счет теплопроводности в твердом металле с криволинейной границей фазового перехода; взаимодействие излучения с металлом и его многократное переотражение внутри узкого канала реза; образование грата, борозд шероховатости и т. д. Большое количество определяющих параметров делает затруднительным только эмпирическое решение данной задачи. При резке толстолистовых металлов огромная роль отводится вспомогательному газу, который ответственен за удаление расплава и чистоту лазерного реза.

К числу главных проблем использования мощных лазеров для резки толстолистовых металлов следует отнести следующее. С повышением мощности излучения, вызванного ростом толщины материала, очень трудно обеспечить необходимое качество одномодового излучения. С ростом толщины металла скорость процесса становится недопустимо низкой. Плохое качество поверхности реза, которое связано с рядом причин, характеризуется повышенной шероховатостью и гратом. Все это дополняется отсутствием достоверных представлений о механизмах появления борозд шероховатости, так как нет развитых методов регистрации и диагностики процессов, протекающих внутри реза.

Вместе с тем, до сих пор уделялось мало внимания исследованию особенностей гидродинамических процессов при изучении взаимодействия лазерного излучения с металлами. Широко распространено недостаточное понимание явлений, в действительности происходящих при лазерной резке толстолистовых металлов. Как известно, роль вспомогательных газов в этом случае заметно повышается. Это связано с необходимостью организации эффективного удаления расплава в глубоком и узком канале реза. Пульсации газа, которые всегда возникают в зоне торможения потока у поверхности листа, переносятся в область внутри реза. Необходимо решать проблему создания устойчивой струи газа, глубоко проникающей через весь лазерный рез. Применяемые до сих пор звуковые сопла с коническими или цилиндрическими выходными насадками создают газовые струи с большими пульсациями давления. В то же время сверхзвуковые сопла могут обеспечить при определенных условиях относительно устойчивое поле течения газа.

Из-за отсутствия развитых методов диагностики и визуализации нет достоверных представлений о процессах, протекающих внутри лазерного реза. Механизмы образования грата и шероховатости, которая имеет бороздчатую структуру, физически недостаточно обоснованы и математически не описаны.

Перечисленные проблемы определили содержание книги. В первой главе представлен обзор известных типов мощных лазеров, лазерных комплексов и существующих в мире технологий лазерной резки различных конструкционных материалов.

Во второй главе обсуждаются проблемы математического и численного моделирования процессов, сопровождающих лазерную резку, на основе решения сопряженных задач механики сплошных сред и физики лазерного взаимодействия с металлами. Дан обзор аналитических методов расчета процессов разрушения поверхности металла под действием сфокусированного лазерного излучения и приведено (полученное авторами) оригинальное приближенное решение задачи о лазерной резке в сопряженной математической постановке.

В третьей главе изложены особенности постановки и численного решения задачи о струйном течении вспомогательного или рабочего газа в узком канале, геометрически подобном каналу лазерного реза. Постановка включает: полные уравнения Навье–Стокса, рассматриваемые в геометрически сложной области, включающей каналы сопла, которое может также быть двойным коаксиальным; металлическую пластину с разрезом, имитирующую лазерный рез и пространство между соплом и разрезом.

В четвертой главе дано обобщение методов регистрации течений газа внутри узких каналов и приведены оригинальные результаты по визуализации отрывных (сверхзвуковых) и вихревых (дозвуковых) течений в канале, геометрически подобном каналу лазерного реза, с использованием теневого метода визуализации и метода нанесения жидкого покрытия.

В пятой главе представлены трехмерные расчеты газодинамических процессов, сопровождающих лазерную резку толстолистовых материалов; исследуется проблема газодинамики дозвуковых и сверхзвуковых течений внутри узкого и плоского канала, которые возникают при резке стальных металлических листов. Численно обнаружены механизмы, способствующие возникновению дефектов, таких как: повышение шероховатости, зашлаковывание канала реза и появление грата. Впервые дано детальное, экспериментально подтвержденное описание причин их возникновения. Предложены практические способы устранения этих дефектов. Теоретически и

экспериментально исследована газодинамика гибридной кислородной резки с поддержкой лазерного излучения для раскроя низколегированных стальных плит толщиной до 50 мм и более. Обсуждаются потенциальные возможности этого качественно нового способа резки толстолистовых материалов.

В шестой главе изложена оригинальная методика регистрации быстро протекающих процессов в канале лазерного реза. Впервые (с использованием легкоплавких материалов) получены результаты модельных экспериментов по визуализации процессов внутри лазерного реза.

В седьмой главе исследовано влияния процессов окисления на эффективность и качество кислородной лазерной резки малоуглеродистых и низколегированных сталей. Предложена физико-математическая модель окисления под действием лазерного излучения и представлены результаты анализа микроструктуры образцов после лазерного воздействия. Дан статистический анализ наблюдаемых закономерностей образования шероховатости при лазерной резке с кислородом низколегированной стали.

В восьмой главе предложена модель образования шероховатости за счет циклов лазерно-индуцированного горения металла в потоке кислорода при лазерной резке малоуглеродистой стали. Представлен подробный анализ результатов трехмерных расчетов.

Авторы

МОЩНЫЕ ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Изобретение лазеров стоит в одном ряду с наиболее выдающимися достижениями науки и техники XX века. Первый лазер был разработан Теодором Майманом в 1960 году в научно-исследовательской лаборатории Хьюза (Hughes Aircraft), где успешно был применен метод оптической накачки активной среды (кристалла рубина) и впервые получено вынужденное оптическое излучение [8]. Это когерентное, монохроматическое, сходящееся электромагнитное излучение с длиной волны, изменяющейся в спектральном диапазоне от ультрафиолетовой до инфракрасной областей.

За 50 лет развития были созданы разнообразные типы лазеров, предназначенных для решения конкретных научных и технических задач. По широте применения лазерная техника сопоставима только с компьютерной. Успехи по созданию и применению лазеров превзошли все ожидания; в настоящее время насчитывается несколько сотен областей применения лазеров на практике. Области эффективного использования лазерных технологий весьма разнообразны — обработка материалов, связь, информатика, медицина, военная техника и многие другие [1].

Наиболее массовой областью использования лазерной техники является лазерная обработка материалов, в основе которой в большинстве случаев лежит тепловое воздействие лазерного излучения. У лазера есть несколько уникальных возможностей для поверхностной тепловой обработки. Электромагнитное излучение лазера поглощается в нескольких первых атомных слоях непрозрачных материалов, таких как металлы, при этом не возникает ни горячих газовых струй, ни вихревых течений, ни потерь излучения вне оптически определенной области луча. Фактически энергия направляется точно на поверхность обрабатываемого материала, где она требуется. Преимущества лазерной обработки по сравнению с другими методами — это: химическая чистота, контролируемые профиль температуры, форма зоны и глубины теплового воздействия; незначительная дополнительная механическая обработка; безконтактность действия и простота автоматизации [2].

Впервые лазерная обработка (резка и сварка) были продемонстрированы в мае 1967 года с применением сфокусированного луча CO_2 -лазера и вспомогательного газового потока. В последнее время качество излучения и выходная мощность лазерных систем значительно возросли. Сейчас лазер принят промышленностью

как надежная технологическая система для резки, сварки, наплавки и упрочнения металлов с большой точностью и высоким качеством.

Лазерная обработка материалов включает в себя резку листовых материалов, сварку, закалку, наплавку, гравировку, маркировку и другие технологические операции. Лазерная резка, сварка и наплавка — сейчас это наиболее значительные технологии применения лазеров для обработки материалов по занимаемой доле рынка. Использование лазерной техники при обработке материалов обеспечивает высокую производительность и точность, экономит энергию и материалы, позволяет реализовать принципиально новые технологические решения и использовать труднообрабатываемые материалы, повышает экологическую безопасность производства [2, 3].

На основе недавних достижений физики и техники созданы новые типы мощных технологических лазеров с существенно более высокой энергетической эффективностью, обеспечивающей значительный прогресс в развитии технологических процессов лазерной обработки. Применение лазерных технологий в машиностроительном производстве чрезвычайно разнообразно. В некоторых случаях лазерные технологии находятся вне конкуренции, так как с помощью лазеров можно получить технические и экономические результаты, которых нельзя достичь другими техническими средствами. Большинство производителей поставляют на рынок не только технологические лазеры, но и лазерные технологические комплексы. В них имеются устройства внешней оптики, управляемые столы, манипуляторы, роботы для перемещения изделия во время обработки, а также программное обеспечение для реализации конкретной технологии. Среди лазерных источников, используемых для обработки материалов, широкое распространение получили высокомощные волоконные, газовые (CO_2) и твердотельные лазеры [3].

Первые в мире технологические лазеры были созданы в СССР и внедрены в промышленность на отечественных электронных заводах. Лидирующие позиции в мире по производству и использованию лазеров сегодня занимают США, страны Западной Европы и Япония.

По данным Лазерной ассоциации, отечественные предприятия в настоящее время выпускают практически все известные виды лазерной техники и в широком ассортименте, однако мировому техническому уровню соответствуют не более 5–10% от всех имеющихся моделей; при этом многие из них остаются, по существу, опытными образцами. Согласно данным опроса машиностроительных предприятий, расположенных в различных регионах России,

который проведен Лазерной ассоциацией, показано, что половина из них нуждается в лазерном оборудовании [2, 3].

1.1. Физические основы мощных технологических лазеров

Двадцатый век воспринимается нами не только как век величайших научных открытий, но и как век возникновения новых инженерно-технических областей человеческой деятельности. Одной из таких областей стало создание и широкое использование квантовых приборов, способных генерировать когерентное, почти монохроматическое электромагнитное излучение оптического диапазона длин волн. Полное наименование таких приборов звучало так: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, что переводится как: «Усиление Света за счет Вынужденного Излучения». Такое название слишком длинное для повседневного его использования, поэтому возник короткий вариант в форме аббревиатуры LASER.

Создание лазеров прямо связано с проблемой усиления света при его прохождении через специально подготовленную оптическую среду. Задача техники — обеспечить создание сред, способных усиливать проходящий через них световой луч. Научное изучение взаимодействия света с веществом продолжается на протяжении примерно 300 лет, но вплоть до рубежа XIX и XX веков изучение велось на феноменологическом уровне. На таком уровне был известен лишь факт поглощения света; при этом даже не возникал вопрос о возможности его усиления. Весь опыт мировой науки не такого уж далекого прошлого убеждал ученых, что любая оптическая среда способна только поглощать и рассеивать проходящий через нее свет.

В основу лазеров положено явление индуцированного излучения, существование которого было предсказано Альбертом Эйнштейном в 1917 году. Согласно А. Эйнштейну наряду с процессами обычного излучения и резонансного поглощения существует третий процесс — вынужденное (индуцированное) излучение. Свет резонансной частоты, то есть той частоты, которую атомы способны поглощать, переходя на более высшие энергетические уровни, должен вызывать свечение атомов, уже находящихся на этих уровнях. Характерная особенность этого излучения заключается в том, что испускаемый свет неотличим от вынуждающего света, то есть совпадает с последним по частоте, по фазе, поляризации и направлению распространения. Это означает, что вынужденное излучение

добавляет в световой пучок точно такие же кванты света, какие уводит из него резонансное поглощение [8].

Атомы среды могут поглощать свет, находясь на нижнем энергетическом уровне, излучают же они на верхних уровнях. Отсюда следует, что при большом количестве атомов на нижних уровнях свет, проходя через среду, будет ослабляться. Напротив, если число атомов на верхних уровнях больше числа невозбужденных атомов, то свет, пройдя через данную среду, усилится. Это означает, что в данной среде преобладает индуцированное излучение. Квантовые усилители и генераторы света, в основу которых положено описанное явление, работают по следующей схеме. Среда усиливает проходящий через нее свет за счет индуцированного излучения, начало которому дает спонтанное излучение одного из атомов или предварительная лазерная накачка. Пространство между зеркалами заполнено активной средой, содержащей определенное количество возбужденных атомов, т.е. атомов с электронами, находящимися на верхних энергетических уровнях. Свет испытывает множество отражений, которые накладываются, усиливая друг друга.

Природа электромагнитного излучения заключается в распространении объединенной волны с осциллирующими электрическим (E) и магнитным (H) полями. Эти компоненты осциллируют под прямыми углами друг к другу, а также к направлению распространения волны с волновым вектором (k). Так как вектор магнитного поля перпендикулярен вектору электрического поля, то описание распространения волны обычно связывают с вектором электрического поля. Когда осцилляции вектора электрического поля происходят в определенном порядке, то говорят о поляризации света. В плоскости поляризации света электрический вектор осциллирует в одной плоскости с волновым вектором. В случае полностью неполяризованного света вектор электрического поля может осциллировать случайно в более чем одном направлении. Для плоскополяризованной волны вектор (H) осциллирует в поперечном направлении по отношению к направлению распространения, изменяясь в пространстве и времени.

Повышение мощности (энергии) лазерного излучения представляется важнейшей технической задачей. Но при решении этой задачи приходится учитывать дополнительные требования к качеству излучения, то есть к его модовому составу, поляризации и расходимости луча. В случае импульсного излучения добавляются требования к длительности и форме импульса. Например, процесс раскроя материалов (дерева, листов металла и др.) требует не только достаточно большой мощности излучения, но также обеспечения

узкого реза с ровными и гладкими кромками. Для этого необходимо сфокусировать на материале лазерный луч в малоразмерное пятно, что осуществляется с помощью линзы. Минимальный размер пятна в фокусе линзы при прочих равных условиях определяется модовым составом излучения. Наилучшие результаты дает одномодовая структура излучения, когда не только обеспечивается тонкий качественный рез, но существенно повышается плотность энергии в пятне, благодаря чему снижаются требования к энергетике лазера.

Термин «мощные лазеры» имеет однозначный смысл, когда речь идет о лазерах, работающих в режиме непрерывной генерации. В этом случае повышение мощности сопровождается повышением энергии излучения, выделяемой в единицу времени, и повышением активности взаимодействия лазерного излучения с веществом. Можно говорить о некоторой условной границе лазерной мощности, превышение которой отнести к категории мощного излучения. Например, таким рубежом можно назвать мощность излучения в 8000 или 15000 Вт, а можно считать рубежом мощность в 1000 Вт. Выбор условной границы, отделяющей «мощные» лазеры от других, определяется конкретными задачами применения лазеров, когда необходимо превысить определенные пороговые уровни термических и иных воздействий лазерного излучения на материалы [9].

Термин «мощные» лазеры приобретает неопределенный смысл, когда лазер генерирует излучение в импульсном или импульсно-периодическом режимах. Одиночный импульс характеризуется несколькими значениями мощности. Во-первых, существует мгновенное значение мощности (мгновенная мощность): при общей длительности импульса t_u в любой момент времени t_i в интервале $0 < t_i \leq t_u$ выделяется малый временной интервал Δt_i , в котором можно пренебречь изменением величины мощности.

Мощность, выделяющуюся в этом временном интервале, называют мгновенным значением для момента времени t_i . Если все мгновенные значения мощности на протяжении импульса соединить плавной кривой, то эта кривая даст представление о форме импульса лазера. Далее в момент времени $t_{\max}$ достигается максимальная за импульс мгновенная мощность $W_{\max}$. Ее называют пиковой мощностью. Площадь, ограниченная осью времени и кривой мощности, пропорциональна энергии лазерного импульса E . Разделив энергию на длительность импульса τ , получим среднее за импульс значение мощности $W_{cp} = E/\tau$. Ее называют средней мощностью. При одном и том же значении энергии

в импульсе средняя мощность зависит от длительности импульса. Например, лазер генерирует малую энергию в импульсе, порядка 0,1 Дж. При миллисекундной длительности импульса (это характерная длительность генерации неодимового лазера, 10^{-3} – 10^{-2} с) средняя мощность составит 10–100 Вт. В микросекундном диапазоне (CO_2 -лазер, 10^{-6} – 10^{-5} с) она достигнет 10^4 – 10^5 Вт. В наносекундном диапазоне (модуляция добротности у твердотельного лазера 10^{-9} – 10^{-7} с) это будет гигантская мощность 10^6 – 10^8 Вт и окажется еще более высокой у лазеров, генерирующих импульсы в пикосекундном (10^{-12} – 10^{-10} с) диапазоне — от 10^9 до 10^{11} Вт. И все это при той же незначительной энергии в импульсе.

Из приведенных оценок видно, что энергетически маломощный лазер с очень коротким импульсом обладает фантастически высокой мощностью. Но нас в дальнейшем будут интересовать лазеры, способные эффективно воздействовать на материалы, а такие лазеры должны обладать достаточно высокой энергией в импульсе. В этом случае высокий уровень мощности сам по себе не является привлекательным. Поэтому принято считать мощными лазерами те из них, которые наряду с высокой средней мощностью обладают и высокими значениями энергии в импульсе [9].

При рассмотрении импульсно-периодического режима работы лазера к характеристикам отдельного импульса добавляется еще одна характеристика — средняя мощность последовательности импульсов. Это — эквивалент энергетического потенциала лазера, но при условии, что дополнительно сообщаются данные об энергии в каждом импульсе, а также данные о длительности и частоте следования импульсов (или о скважности).

Итак, под мощными лазерами будем понимать только те лазеры, которые генерируют мощное высокоэнергетичное излучение.

Особенности лазерного воздействия на конструкционные материалы, обеспечивающего протекание технологических процессов (резка, сварка, наплавка, поверхностная закалка и некоторые другие), требует значительных энергетических затрат. Величина таких затрат определяется тем, что каждый подобный процесс может протекать лишь в условиях, когда плотность энергии в пятне облучения превышает определенное пороговое значение. Порог не является универсальной величиной, он зависит от обрабатываемого материала, от параметров лазерного луча — длины волны, размеров пятна облучения на поверхности изделия, режима воздействия (непрерывного, частотно-импульсного или импульсного), от условий, в которых протекает процесс (в атмосфере, в нейтральной, окислительной или восстановительной среде) и т. д.

Подготовка любого технологического процесса с применением лучевого лазерного инструмента для обработки конкретного изделия требует индивидуальной разработки этого процесса. В основе такой разработки присутствует знание физических факторов воздействия высокоэнергетического лазерного излучения на вещество и знание результатов экспериментальных исследований зависимости порога плотности энергии от различных факторов.

Фактор теплового воздействия лазерного излучения на материалы осуществляется либо в непрерывном, либо в импульсно-периодическом режимах. Еще один фактор прямого воздействия проявляется в импульсном режиме. При очень коротком времени воздействия сильноточного лазерного импульса на изделие происходит выброс мощной струи пара в направлении, перпендикулярном плоскости поверхности. В результате возникает импульс отдачи, способный вызвать отброс незакрепленного изделия или деформацию его поверхности [3]. Величина импульса отдачи растет с ростом интенсивности лазерного импульса, она зависит от материала, от длительности импульса воздействия, от размеров пятна облучения. Эксперименты показали, что при прочих равных условиях импульс отдачи не может расти беспредельно; на определенном рубеже интенсивности луча возникает плазма, прерывающая доступ части оптического потока к поверхности. Величина импульса отдачи насыщается, и дальнейший рост интенсивности луча на эту величину не оказывает влияния [3].

Само по себе знание факторов лазерного воздействия на материалы конкретизируется лишь в случае, когда известен характер зависимостей пороговых значений плотности энергии (мощности) в пятне облучения на протекание конкретных технологических процессов обработки материалов. Пока остаются неясными пути, на которых может быть создана единая теория взаимодействия лазерного луча с различными материалами в различных условиях. Выяснение характера зависимостей пороговых значений плотности энергии, обеспечивающих возможность обработки тех или иных материалов лазерным воздействием, осуществляются экспериментально.

На основании сказанного выше следует, что основным фактором, обеспечивающим силовую высокоэнергетическую обработку материалов, является тепловое воздействие лазерного луча на поверхность изделия при условии, что плотность энергии в пятне облучения превышает определенное для данных условий пороговое значение, при котором начинается процесс интенсивного плавления или даже испарения материала. Если воздействие осуществляется излучением с длиной волны 10,6 мкм (CO_2 -лазер), то глубина

проникновения поглощаемого луча в непрозрачный материал составляет всего 1–2 мкм [3]. Путем фокусировки луча на поверхности в пятно порядка 1 мм нетрудно достичь необходимого эффекта даже при сравнительно небольших мощностях используемого лазера. В случае более коротковолнового излучения, например 1,06 мкм (лазер на алюмоиттриевом гранате с присадкой неодима), глубина проникновения луча в среду увеличивается, соответственно возрастает величина пороговой плотности.

Однако для получения разреза в материале и дальнейшего его углубления следует убирать расплав или выделяющиеся пары материала. С этой целью осуществляется непрерывный продув места обработки материала, например нейтральным газом — азотом или аргоном. Тогда реализуется процесс послойного плавления или испарения материала и удаления продуктов его плавления или паров вплоть до образования разреза нужной глубины. Такой процесс требует определенного времени, и для его ускорения приходится повышать плотность энергии в пятне облучения (иногда намного выше порогового значения) и увеличивать расход продуваемого газа [3]. Однако при повышении плотности энергии выше определенного значения образующиеся пары материала начинают вырываться в форме плазмы еще до окончания протекающего процесса резания. Плазма экранирует обрабатываемую поверхность, прекращая доступ к ней луча, что срывает протекание ведущегося процесса. Возникает второе пороговое значение плотности энергии в пятне облучения, превышение которого сопровождается образованием плазмы. В этой связи наиболее важной задачей становится определение второго порогового значения, а также характеристик возникающей плазмы и особенностей взаимодействия с ней лазерного луча.

Открытие эффекта низкорогового пробоя пара у поверхности твердого тела имело два важных следствия. Во-первых, было наглядно показано, что в процесс воздействия лазерного луча на материалы активно вторгается плазма, способная экранировать эту поверхность от излучения и снижать эффективность прямого действия луча на объект. Во-вторых, сама плазма создает интенсивное оптическое излучение в широком диапазоне длин волн, становясь источником вторичного воздействия на обрабатываемые материалы [6].

1.2. Типы промышленных лазеров и области их применения

Лазерные системы делятся на три основные группы: твердотельные лазеры; газовые, среди которых особое место занимает CO_2 -лазеры, и полупроводниковые лазеры. Некоторое время назад появились такие системы, как перестраиваемые лазеры на красителях, твердотельные лазеры на активированных стеклах и волоконные лазеры. Остановимся подробнее на существующих типах лазеров и областях их применения [1–3, 7–9].

Твердотельный лазер — это оптический квантовый генератор, где в качестве активной среды используется вещество, находящееся в твердом состоянии. Самым первым твердотельным лазером был излучатель на рубине, накачка осуществлялась газоразрядной лампой. Режим генерации может быть непрерывным или импульсным. Длина волны излучения твердотельного лазера — 0,69 мкм. Наиболее распространены твердотельные лазеры на кристаллах рубина (Al_2O_3 с примесью ионов Cr^{3+}), а также на кристаллах и стеклах, содержащих ионы Nd^{3+} .

Твердотельный лазер содержит в качестве активной среды кристаллы или стекла, которые активируются ионами металлов или ионами редкоземельных элементов. Эти активные ионы поглощают оптическое излучение в широкой спектральной области. В результате релаксационных процессов или излучательных переходов через различные промежуточные уровни происходит возбуждение относительно долгоживущего (метастабильного) уровня в качестве исходного уровня для испускания вынужденного излучения, т. е. лазерного перехода. Твердотельные лазеры излучают преимущественно в видимой и ИК-спектральной областях и характеризуются высокой импульсной мощностью (при относительно низком качестве излучения).

Возбуждение происходит исключительно с помощью оптической накачки при использовании подходящих источников света. Накачка твердотельных лазеров происходит непосредственно с помощью излучения. Инверсия заселенностей создается при слабозаселенном нижнем лазерном уровне (исключение — рубиновый лазер) благодаря достаточному возбуждению верхнего уровня; при этом в качестве лазерных переходов преимущественно рассматриваются переходы, которые имеют в спектрах флуоресценции максимальную интенсивность излучения. Активные элементы изготавливаются в виде стержней с отполированными торцевыми поверхностями, с нанесенными зеркальными покрытиями, а также с обработанной

поверхностью для эффективного введения излучения накачки. Излучение накачки создается в импульсном или непрерывном режиме с помощью ламп различных форм и наполнения газом, а также с помощью лазера. В качестве источников накачки для твердотельных лазеров применяются: ксеноновые лампы, криптоновые лампы, ртутные лампы высокого давления, галогенные лампы.

Из твердотельных лазеров наибольшее распространение для обработки материалов (сварка лазерным излучением, лазерная резка металла и др.) получили лазеры на рубине, стекле с неодимом и на гранатах с неодимом.

Рубиновый лазер. Этот лазер преимущественно работает в импульсном режиме и генерирует излучение на длине волны 0,6943 мкм. Из-за возможности получения больших импульсных мощностей, а также наличия рубиновых кристаллов высокого оптического качества рубиновый лазер в настоящее время является одним из наиболее известных твердотельных лазеров. Рубиновый кристалл состоит из молекул оксида алюминия; в его решетке вместо некоторых ионов алюминия внедрены ионы хрома.

Рубиновые кристаллы имеют стержневую форму диаметром 0,3–2 см и длину до 30 см. Рубиновые кристаллы оптически хорошего качества относительно легко изготавливать, они имеют большую механическую прочность и высокую теплопроводность, что облегчает охлаждение кристалла. Излучение накачки создается мощными стержневыми ксеноновыми лампами с несколькими эллиптическими отражателями или спиральными лампами. Излучение рубинового лазера характеризуется большой мощностью при невысоком качестве излучения (неоднородное распределение по поперечному сечению, пиковый характер излучения).

Неодимовый стеклянный лазер. Этот лазер является твердотельным лазером, излучающим в ближнем ИК-диапазоне, который применяется, например, для лазерного управляемого термоядерного синтеза, обработки материалов (сварка лазерным излучением, лазерная резка и др.) или (при меньших мощностях) в качестве лазера накачки. В качестве активных ионов в стекло, используемое в качестве матрицы, вводятся ионы Nd^{3+} с массовым содержанием 0,5–8 %. Неодимовый стеклянный лазер работает по четырехуровневой схеме. Поскольку нижний лазерный уровень почти не заселен, то этот тип лазеров обладает относительно низкой пороговой мощностью, в результате чего нетрудно осуществить непрерывный режим работы. Для оптической накачки преимущественно применяются стержневые импульсные лампы с эллиптическим отражателем. В качестве материала матрицы используются силикатное,

фосфатное и бариевое стекла. Преимущества стекла заключаются в простоте изготовления активных элементов с большими размерами и хорошем оптическом качестве. Недостатки связаны с: низким коэффициентом теплопроводности (для непрерывного режима работы необходимы специальные стекла), сильным уширением линии флуоресценции и линии поглощения (частично неоднородным); неблагоприятным отношением неоднородной ширины к однородной ширине линии флуоресценции в силикатном стекле.

Nd:YAG-лазер. В настоящее время лазер этого типа является важнейшим твердотельным лазером. Он характеризуется тем, что при относительно простой конструкции достигаются высокие мощности в импульсном режиме при высокой частоте следования импульсов лазерного излучения (до 10 кГц) или даже в непрерывном режиме. Физический принцип получения инверсии заселенностей в этом лазере точно совпадает, при том же активном ионе Nd^{3+} , с принципом создания инверсии заселенностей в лазере на стекле с неодимом. Основное отличие заключается в использовании кристаллической матрицы. В Nd:YAG-лазерах используется алюмо-иттриевый гранат («YAG», $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) с добавками неодима (Nd). Генерация происходит на длине волны 1064 нм. Такие лазеры могут работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Преимущества алюмо-иттриевого граната по сравнению со стеклом: высокая механическая прочность и твердость; хорошая теплопроводность; отсутствует необходимость в компенсации заряда.

Кристаллы алюмо-иттриевого граната применяются в виде стержней диаметром 0,3–0,8 и длиной 3–10 см. Возбуждение среды происходит с помощью оптической накачки в следующих режимах:

а) в импульсном режиме — ксеноновыми импульсными лампами, часто в простом устройстве с цилиндрическим отражателем;

б) в непрерывном режиме — галогенными лампами и (преимущественно для высоких мощностей) криптоновыми дуговыми лампами в устройствах с одним или двумя эллиптическими отражателями.

Nd:YAG-лазеры являются основными источниками накачки и источниками излучения в современной лазерной физике. Лазер генерирует линейно поляризованное излучение и тем самым пригоден, в частности, в качестве источника накачки для нелинейной оптики. Благодаря большой мощности импульса они применяются также в офтальмологии для лазерной резки тканей. В промышленных целях (сварка лазерным излучением, лазерная резка металла и др.). Nd:YAG-лазеры применяются для обработки малогабаритных деталей.

Твердотельные лазеры находят все более широкое применение как в фундаментальных научных исследованиях, в области нелинейной оптике, так и в машиностроении, медицине, что обусловлено, главным образом, возможностью достижения большой удельной энергии и мощности при генерации импульса благодаря высокой концентрации активных частиц. В технологии (резка, сварка, наплавка и т. п.) используются твердотельные лазеры на основе рубина, неодимового стекла и $Y_2Al_5O_{12}(Nd^{3+})$ с мощностью генерации от десятков ватт до нескольких киловатт.

В медицине применяются, главным образом, лазеры на неодимовом стекле с энергией излучения 1000 Дж в режиме свободной генерации (терапия) и на $Y_2Al_5O_{12}(Nd^{3+})$ в непрерывном или периодическом режимах (хирургия). Этот же тип лазера используется в оптической локации и связи. Сверхмощные твердотельные лазеры на стекле с Nd применяются для исследования термоядерной плазмы. Разновидностями твердотельных лазеров являются полупроводниковые и волоконные лазеры.

Газовые лазеры. В качестве активной среды используется вещество, находящееся в газообразном состоянии. Накачка производится с помощью высоковольтных электрических разрядов; электроны, соударяясь с атомами газа, переводят их на возбужденные энергетические уровни. К достоинствам газовых лазеров относятся: дешевизна вещества рабочей среды, высокая энергетическая эффективность и возможность работы в непрерывном режиме. Разновидностями газового лазера являются газодинамические CO_2 -лазеры и эксимерные лазеры. CO_2 -лазеры — на основе смеси газов CO_2 -He- N_2 . Возбуждение смеси выполняется разными видами электрического разряда в газах. Длина волны излучения CO_2 -лазера — 10,6 мкм. В настоящее время самыми компактными и эффективными являются так называемые щелевые (slab) лазеры с накачкой высокочастотным разрядом. Импульсные лазеры режут с высоким качеством не только сталь и титан, но и алюминиевые сплавы. Возможна резка и сплавов на медной основе, но здесь эффективность очень сильно зависит от химического состава сплава.

CO_2 -лазеры широко используются для резки металлов и неметаллов. Не рекомендуется использовать эти лазеры для резки сложной структурой — ДСП, бакелитовые фанеры, граниты. Для резки металлов нужен достаточно большой уровень мощности (от 500 Вт), а для резки цветных металлов — от 1000 Вт и более. Здесь особенно эффективны щелевые CO_2 -лазеры, которые обеспечивают суперимпульсный режим излучения в отличие от других CO_2 -систем. Это значит, что световой поток не непрерывен, а состоит

из импульсов с частотой 10–20 кГц, так что при средней мощности, например 500 Вт, мощность в импульсе составляет 1000–1500 Вт. При резке металлов это очень важно, так как уменьшается ширина реза, улучшается качество и снижается порог начала резки.



Рис. 1.1. а) Газовый щелевой CO_2 -лазер фирмы ROFIN из серии диффузионно-охлаждаемых лазеров мощностью до 10000 Вт; б) CO_2 -лазер фирмы TRUMPF с высокой мощностью до 20000 Вт, со свободной быстроточной аксиальной циркуляцией газа и емкостным радиочастотным возбуждением

Основными производителями промышленных CO_2 -лазеров в настоящее время являются германские фирмы ROFIN-SINAR и TRUMPF. На рисунках 1.1 (а, б) представлены фотографии CO_2 -лазеров этих фирм с высоким качеством излучения, предназначенных для резки, сварки и обработки поверхности.

В ИТПМ СО РАН разработаны серии CO_2 -лазеров мощностью от 1,0 до 8 кВт, оснащенных SFUR-резонатором, который генерирует излучение высокого качества, близкое к TEM_{00} -моду, рис. 1.2, [7].

Газовая смесь (двуокись углерода, азот, воздух) циркулирует по замкнутому контуру. Принудительная циркуляция обеспечивается специальным прокачивающим устройством. В электроразрядной камере осуществляется накачка среды электрическим разрядом. Активная среда формируется вследствие протекания электрического тока между двумя, протяженными вдоль оптической оси электродами. В электроразрядную камеру вмонтированы оптические элементы, образующие резонатор, через которые выводится излучение. Теплообменником снимается избыточное тепло (рис. 1.3).

Лазеры данного класса, как уже отмечалось, работают на смеси $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$. Но для некоторых потребителей гелий является достаточно труднодоступным и дорогим газом. Поэтому предлагается вариант лазера, работающего на воздухе и CO_2 . Применение гелия и газов повышенной чистоты позволяет удвоить мощность лазера [7].

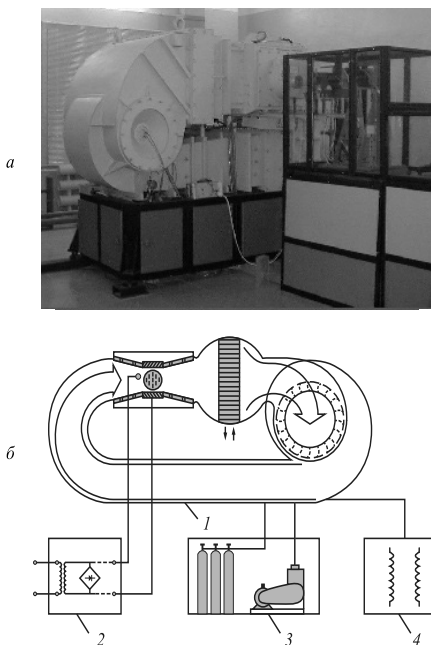


Рис. 1.2. а) Газовый CO_2 -лазер мощностью 8 кВт с поперечным разрядом; б) функциональная схема лазера: 1 — газодинамический канал, 2 — источник питания, 3 — газо-вакуумная система, 4 — теплообменник.

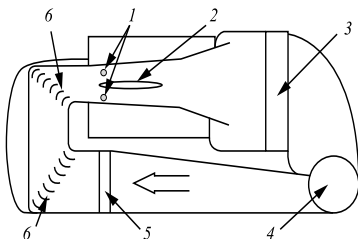


Рис. 1.3. Схема газодинамического контура CO_2 -лазера с поперечным разрядом на базе двухмодульного электроразрядного устройства: 1 — катод, 2 — анод, 3, 5 — теплообменник, 4 — вентилятор, 6 — поворотные лопатки.

Полупроводниковые лазеры составляют самую многочисленную группу и отличаются от твердотельных и газовых тем, что излучающие переходы происходят в полупроводниковом материале не между дискретными энергетическими состояниями электрона, а между парой широких энергетических зон. Поэтому переход электрона из зоны проводимости в валентную зону с последующей рекомбинацией приводит к излучению, лежащему в относительно широком спектральном интервале и составляющему несколько десятков нанометров, что намного шире полосы излучения газовых или твердотельных лазеров.

Накачка осуществляется инжекцией через гетеропереход, а также электронным пучком. Гетеролазеры миниатюрны, имеют высокий КПД, могут работать как в импульсном, так и в непрерывном режимах. Несмотря на низкую мощность, они нашли свое применение в промышленности. Они применяются для спектроскопии, оптической стандартизации частоты, оптико-волоконных линий связи, для контроля формы, интерференционных полос деформации, в оптико-электронике, в робототехнике, в системах пожаробезопасности. В быту применяются в системах оптической обработки информации (в сканерах) в паре с несложной системой многогранных зеркал, служащих для отклонения луча, в звуко- и видеосистемах, в охранных системах.

В последнее время полупроводниковые лазеры благодаря своим малым размерам применяются и в медицине. Лазеры с электронной накачкой перспективны в системах проекционного лазерного телевидения.

Жидкостные лазеры и лазеры на красителях. Жидкостные лазеры — это лазеры, в которых рабочим телом является жидкость, вследствие чего они обладают рядом уникальных свойств.

Преимущества жидкостных лазеров заключаются в том, что они имеют значительно более высокую концентрацию активных атомов, которую легко можно изменять. Активная среда является дешевой и относительно мало подверженной повреждению. Накачка осуществляется светом импульсных ламп. Энергетические параметры жидкостных лазеров близки к соответствующим параметрам твердотельных лазеров. Когда жидкостные лазеры работают в импульсном режиме, их выходная мощность может достигать сотен и более мегаватт. При непрерывном режиме типичные уровни выходной мощности составляют доли ватта. Спектр излучения лежит в видимом диапазоне излучения. Жидкостные лазеры не столь громоздки, как газовые системы, и проще в эксплуатации. Достоинствами жидкостных лазеров являются возможность перестройки частоты

генерации и малая расходимость излучения; недостатками — малый КПД, малая монохроматичность излучения, нестабильности параметров излучения, большие габариты и масса.

Среди известных типов жидкостных лазеров наибольшее значение имеют лазеры на органических красителях. Существенным преимуществом лазера на красителях является возможность плавно перестраивать частоту излучения в пределах значительного спектрального диапазона.

В качестве накачки лазера на красителях обычно применяют другой лазер, например, Nd:YAG с диодной накачкой или аргоновый. Основная особенность лазеров на красителях — очень большая ширина контура усиления. Это — единственные известные в настоящее время лазеры, в которых можно плавно менять частоту излучения в довольно широких пределах. Красители — это сложные органические соединения, которые в определенной среде, прежде всего в жидких растворах, поглощают свет в широком диапазоне длин волн. Такая особенность красителей является следствием особенностей их строения, точнее, структуры их энергетических уровней. Как говорилось выше, каждая молекула кроме электронных уровней имеет еще вращательно-колебательные уровни, соответствующие разрешенным значениям энергии ее вращательного и различных форм колебательного движений. Над каждым электронным уровнем лежит полоса, как правило, значительно ближе отстоящих друг от друга вращательно-колебательных уровней. В молекулах красителей расстояния между уровнями в каждой полосе настолько малы, что с учетом причин, приводящих к уширению (размыванию) отдельных уровней, можно считать, что отдельные уровни непрерывно переходят друг в друга. Отсюда, собственно говоря, и получается богатство различных спектральных линий, которые непрерывно переходят друг в друга, создавая широкие полосы (на шкале частоты) как поглощения, так и испускания света.

Активная среда лазера на красителе состоит из раствора органического красителя. Когда краситель возбуждается внешним источником коротковолнового излучения, он излучает на более длинных волнах или флуоресцирует, поглощая фотон на длине волны возбуждения, а затем излучая фотон на длине волны флуоресценции. Все лазеры на красителях накачиваются оптическим методом. При накачке важно, чтобы источник накачки излучал на частотах, близких к положению максимума полосы поглощения. По самой природе красителя лазерное излучение является более длинноволновым, чем возбуждающее излучение.