

№ 459

В.М. Жариков

Металлургические машины и оборудование

Расчет основных параметров
лазерного технологического оборудования

Учебное пособие

№ 459

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра инжиниринга технологического оборудования

В.М. Жариков

Металлургические машины и оборудование

Расчет основных параметров лазерного
технологического оборудования

Учебное пособие

Допущено учебно-методическим объединением по образованию в области металлургии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 150404 – Металлургические машины и оборудование направления 150400 – Технологические машины и оборудование



Москва 2011

УДК 621.7
Ж34

Рецензент
д-р техн. наук, проф. *Б.А. Романцев*

Жариков, В.М.

Ж34 **Металлургические машины и оборудование : расчет основных параметров лазерного технологического оборудования : учеб. пособие / В.М. Жариков. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2011. – 106 с.**

ISBN 978-5-87623-459-9

В пособии рассмотрены основы лазерной техники и технологии. Подробно изложены критерии и последовательность выбора оптимального лазерного источника для заданной технологической операции. Рассмотрены основные принципы конструирования лазерного технологического оборудования.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 150400 «Технологические машины и оборудование».

УДК 621.7

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Физические основы лазерной техники	8
1.1. Основные квантовые представления	8
1.2. Индуцированное излучение.....	10
1.3. Способы накачки (создания инверсной заселенности)	14
1.4. Классификация лазеров.....	16
1.5. Типовой состав лазера.....	18
1.6. Типы резонаторов	18
1.7. Зеркала	20
1.8. Лазер как уникальное явление	21
1.9. Связь фокусировки с параметрами лазерного излучения	22
2. Оптика.....	23
2.1. Явление полного внутреннего отражения. Световоды	23
2.2. Генерация гармоник	23
2.3. Ширина линии лазерного излучения.....	24
2.4. Отражение электромагнитного излучения от диэлектриков ...	24
2.5. Формулы Френеля	27
2.6. Угол Брюстера.....	29
3. Элементы лазерной технологии	30
3.1. Распространение тепла при лазерном воздействии	30
3.2. Уравнение теплопроводности	31
3.3. Упрощенная модель воздействия лазерного излучения на мишень.	33
3.4. Поверхностная обработка	34
3.5. Лазерная сварка металлов.....	52
3.6. Лазерная пробивка отверстий	53
3.7. Лазерная разделительная резка материалов	61
3.8. Определение технических требований к процессу и инструменту при лазерной обработке	62
3.9. Поглощающие покрытия	65
4. Лазерное технологическое оборудование	68
4.1. Состав лазерного оборудования.....	68
4.2. Координатные столы.....	70
4.3. Оптические системы лазерных технологических установок...	74
4.4. Приемники оптического излучения.....	82
4.5. Выбор оптимального устройства охлаждения лазера	84
4.6. Обзор отечественных ЛТУ и ЛТК	85
Библиографический список	98
Приложение.....	99

ВВЕДЕНИЕ

Вторая половина XX в. принесла миру ряд новых направлений в науке и технике: кибернетику, ракетостроение, лазеры. Перспективы каждого из этих направлений выглядели одинаково высокими. Надежды, связанные с каждым направлением, были завышенными и оптимистичными.

По прошествии полувека можно констатировать, что для первых двух направлений эти надежды частично оправдались:

- компьютерная техника прочно вошла в обиход широких слоев населения;
- произошло успешное освоение ближнего космоса, идет обсуждение возможности международной экспедиции на Марс, Китай планирует осуществить проект по строительству обитаемой станции на Луне к 2050 г.

На этом фоне успехи квантовой электроники более скромные. Можно прогнозировать, что ближайшие годы станут временем развития лазерной техники и технологии. К уже освоенным лазерным технологическим операциям можно отнести: лазерное разделение изотопов; получение сверхчистых веществ; сварку; скрайбирование полупроводников; удаление пленочных покрытий; резку листовых материалов; наплавку; упрочнение металлов и др.

Учитывая, что данный курс является непрофильным в НИТУ МИСиС, представляется целесообразным освежить в памяти или же изложить вновь некоторые сведения из курса общей физики: физики атома, квантовой механики, оптики, электричества, термодинамики и т.д., необходимые для успешного усвоения и понимания основ лазерной технологии обработки материалов.

Необходимые для расчета параметров лазерного технологического оборудования справочные данные приведены в приложении.

Условные обозначения

P – мощность лазерного излучения средняя, Вт;

$P_{\text{имп}}$ – мощность лазерного излучения импульсная (пиковая, мгновенная), Вт;

ν_{21} – частота атомного перехода (лазерного излучения) с уровня 2 на уровень 1, Гц;

W_{12} – вероятность атомного перехода с уровня 1 на уровень 2;

n_1 – населенность уровня 1, число атомов в единице объема, обладающих энергией, соответствующей энергии уровня 1;
 h – постоянная Планка, $6,626176 \cdot 10^{-34}$ Дж · с;
 k – постоянная Больцмана, $1,380662 \cdot 10^{-23}$ Дж · К⁻¹;
 R_λ – спектральный коэффициент отражения;
 c – коэффициент теплоемкости материала, Дж/(кг · К);
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м · К;
 ρ – плотность материала, кг/м³;
 a – коэффициент температуропроводности, м²/с;
 f – частота следования импульсов излучения лазера, Гц;
 F – фокусное расстояние оптического элемента (линзы, объектива, или зеркала), м;
 θ – угол расходимости лазерного излучения, мрад;
 $d_{\text{лп}}$ – диаметр лазерного пятна, мкм;
 q – плотность мощности в зоне обработки, Вт/м²; допускается Вт/см²;
 $T_{\text{пл}}$ и $T_{\text{исп}}$ – температура соответственно плавления и испарения материала

Основные термины

Лазер (оптический квантовый генератор) – источник когерентного монохроматического электромагнитного излучения оптического диапазона, действие которого построено на использовании вынужденного излучения атомов и молекул. LASER – аббревиатура слов английского выражения Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (усиление света вынужденным излучением).

Лазерная техника – совокупность технических средств для генерации, преобразования, передачи, приема и использования лазерного излучения (включает в себя собственно, лазеры, их элементы – излучатели, активные элементы, оптические резонаторы, лазерные затворы, источники накачки, блоки питания и управления, системы охлаждения и др.); устройства управления лазерным пучком (модуляторы света, дефлекторы, преобразователи частоты и др.).

Лазерная технология – совокупность способов обработки, изменения состояния, свойств и формы материала или полуфабриката, осуществляемых посредством лазерного излучения.

Резонатор – устройство, состоящее из системы зеркал, служащее для:

- формирования воспроизводимой структуры лазерного луча;

- многократного возврата излучения в активную среду с целью увеличения длины взаимодействия излучения с активной средой;
- формирования диаграммы направленности (ДН) излучения и обеспечения стабильности положения оси диаграммы направленности;
- отвечает за расходимость лазерного излучения.

Расходимость лазерного излучения (РЛИ) – принципиальный параметр лазерного излучения, характеризующий предельные возможности его фокусировки и заключающийся в угле расширения лазерного луча на значительном расстоянии от лазерного источника. РЛИ на несколько порядков меньше, чем у традиционных источников света.

Монохроматичность – степень близости колебаний к идеальным колебаниям, имеющим вид

$$X = A \cos(\omega t + \varphi),$$

где амплитуда A , частота ω и фаза φ не зависят от времени t .

Реальные колебания и волны не являются идеально монохроматическими. Немонохроматические колебания можно представить в виде суммы (конечного или бесконечного числа) идеальных монохроматических колебаний. Чем выше монохроматичность, тем в меньшем интервале частот группируются эти монохроматические составляющие.

Хронология развития лазерной тематики

Год	Этап	Автор
1917	Введение понятия вынужденного (индуцированного) излучения	А. Эйнштейн
1928	Экспериментальное обнаружение вынужденного излучения	Х. Копферман, Р. Ладенбург
1950	Экспериментальное обнаружение инверсии заселенностей	Э. Парселл, Р. Паунд
1951	Предложение об усилении за счет вынужденного излучения	В.А. Фабрикант, Дж. Вебер
1954	Первый мазер на аммиаке	Дж. Гордон, Х. Цайгер, Ч. Таунс
1957	Первый твердотельный мазер	Дж. Гордон, Х. Цайгер, Ч. Таунс
1958	Предложение об усилении за счет вынужденного излучения в оптическом диапазоне	А. Шавлов, Ч. Таунс
1959	Предложение о создании газового лазера	А. Джанаван
1959	Предложение о создании полупроводникового лазера	Н.Г. Басов, Б.М. Вул, Ю.М. Попов
1960	Первый твердотельный (рубиновый) лазер	Т. Мейман

1961	Первый He-Ne лазер	А. Джанаван, В.Р. Беннет (мл.), Д. Эрриот
1961	Обнаружение нелинейного оптического эффекта (генерация гармоник)	П. Франкен, А.Хилл, Ч.Питерс, Г.Вейнрайх
1962	Первый полупроводниковый (инжекционный) лазер	М. Натан, В. Думке, Г, Бёрнс, Ф. Дил(мл.), Г. Лашер
1965	Первый лазер на центрах окраски	Б. Фритц, Е. Менке
1966	Первый лазер на красителе	П. Сорокин, Дж. Ланкард
1969	Соединение инжекционного лазера с электронными элементами (интегральная оптика)	С. Миллер
1971	Первый лазер с распределенной обратной связью	К. Шенк, Дж. Бьёркхолм, Х. Когельник
1977	Первый лазер на свободных электронах	Д. Дикон, Л. Элайес, Дж. Мейди, Г. Реймен, Х. Шветтман, Т. Смит
1984	Первый солитонный лазер	Л. Молленауэр, Р. Штолен
1995	Первый волоконный лазер	В.П. Гапонцев

Вклад российских ученых в квантовую электронику

Год	Персоналии	Суть достижения
1951	В.А. Фабрикант	Предсказал усиление за счет вынужденного излучения
1959	Н.Г. Басов	Обосновал создание полупроводникового лазера
1958	И. Франк, И. Тамм, П. Черенков	Нобелевская премия за открытие эффекта Вавилова – Черенкова
1962	Ю.Н. Денисюк	Ленинская премия за метод получения голографического изображения
1964	А.М. Прохоров, Н.Г. Басов	Нобелевская и Ленинская премии за открытие лазеров
1995	В.П. Гапонцев	Создание волоконного лазера. Государственная премия РФ за 2011 г.
2000	Ж.И. Алферов	Нобелевская премия за исследование полупроводниковых гетероструктур
2003	А.А. Абрикосов, В.А. Гинзбург	Нобелевская премия за объяснение явлений сверхпроводимости и сверхтекучести с позиций квантовой электродинамики

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ

1.1. Основные квантовые представления

Основным положением квантовой физики является утверждение, что атомы или соизмеримые с ними системы могут находиться только в некоторых дискретных разрешенных энергетических состояниях или на определенных энергетических уровнях.

Энергетические уровни атома обычно отстоят друг от друга на несколько электронвольт. В случае теплового равновесия при комнатной температуре атом чрезвычайно редко может оказаться на каком-либо уровне, кроме самого низкого, называемого *основным энергетическим уровнем*. Поскольку при комнатной температуре средняя тепловая энергия kT электронов составляет всего около $1/40$ эВ (эВ – электронвольт, допускаемая к применению в физике, наравне с единицами СИ, внесистемная единица энергии; 1 эВ равен энергии, которую приобретает заряженная частица, несущая единичный элементарный заряд, при перемещении в электрическом поле между двумя точками с разностью потенциалов 1 В; $1\text{эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Дж, энергия тепловых флуктуаций очень редко оказывается достаточной, чтобы атом мог перейти на более высокий энергетический уровень. В отсутствие теплового равновесия атомы, конечно, могут перейти на более высокие энергетические уровни под действием различных внешних возбуждающих факторов, например, сильных электрических полей в электрическом разряде.

В соответствии с основными положениями квантовой теории атомы или другие системы могут совершать скачки, или переходы, между двумя разрешенными энергетическими уровнями, сопровождающиеся испусканием или поглощением порции электромагнитной энергии – кванта. В зависимости от того, в какую сторону совершается переход – в сторону меньшей или большей энергии, квант уносит или приносит с собой энергию, теряемую или приобретаемую атомом в результате скачка, что в целом обеспечивает сохранение энергии. Частота ν излучаемого или поглощаемого кванта непосредственно связана с величиной энергетического скачка ΔE соотношением Планка

$$\Delta E = h\nu, \quad (1.1)$$

где h – постоянная Планка.

Имеются два различных вида переходов между энергетическими уровнями, сопровождающихся испусканием фотонов: спонтанные (самопроизвольные) и индуцированные (вынужденные). Первые всегда сопровождаются спонтанным излучением: атом переходит с верхнего энергетического уровня на нижний, испуская при этом квант с частотой, определяемой соотношением (1.1). Для верхних энергетических уровней атома спонтанное излучение является обычно преобладающим процессом. Если даже атом каким-либо образом оказался на верхнем энергетическом уровне, он быстро вернется обратно на основной уровень в результате спонтанного излучения кванта света или, возможно, нескольких квантов, если атом совершает ступенчатый переход через несколько промежуточных энергетических уровней. Видимый свет, излучаемый электрической дугой, пламенем свечи и костра, обусловлен именно спонтанным излучением возбужденных атомов.

Наоборот, индуцированные переходы между энергетическими уровнями вызываются (индуцируются) внешним электромагнитным излучением. Частота этого излучения должна быть равна или близка частоте перехода, определяемой соотношением Планка. Если это условие соблюдается, то излучение может воздействовать на атом, «вынуждая» его совершить переход. Если индуцированный переход происходит в сторону более высокой энергии, то атом поглощает квант индуцирующего излучения, тем самым ослабляя внешнее электромагнитное поле. Если же переход совершается в сторону более низкой энергии, то атом отдает (излучает) квант индуцирующему излучению. По отношению к пришедшему излучению переход на более высокий уровень соответствует процессу ослабления, а на более низкий уровень – процессу усиления. Индуцированные переходы обладают следующим важным свойством: при заданных параметрах приходящего излучения вероятности перехода атомов с верхнего уровня на нижний и с нижнего на верхний равны друг другу. Эти вероятности пропорциональны интенсивности приходящего излучения.

Изложенной информации достаточно для понимания и объяснения оптических свойств окружающих предметов. Например, почему стекло прозрачно, а кирпичная стена, состоящая практически из тех же окислов, полностью блокирует прохождение света. Все дело в наличии или отсутствии энергетических уровней вещества, совпадающих с энергией световых квантов.

Исключения составляют электрические проводники. Непрозрачность металлических материалов связана с наличием в металле сво-