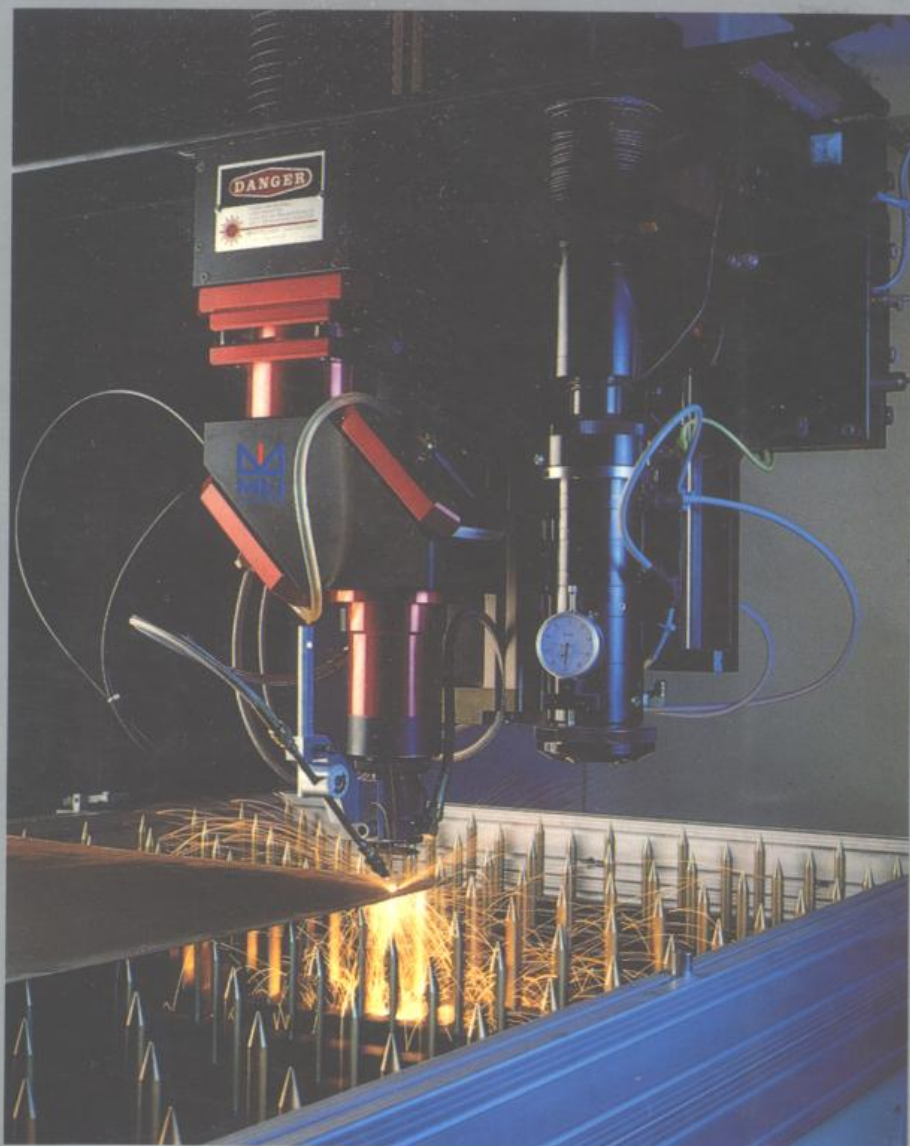




高功率激光加工 及其应用

闫毓禾 钟敏霖 编著

天津科学技术出版社

高功率激光加工 及其应用

闫毓禾 钟敏霖 编著

天津科学技术出版社

津新登字(90)003号

责任编辑:张炳祥

高功率激光加工及其应用

阎毓禾 钟敏录 编著

*

天津科学技术出版社出版

天津市张自忠路189号 邮编 300020

天津新华印刷二厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本 787×1092毫米 1/16印张 15.5 插页 3 字数 376 000

1994年4月第1版

1994年4月第1次印刷

印数:1—3 200

ISBN 7-5308-1632-2

TP·55 定价:16.20元

前言

127-377-11
DE37/51

激光加工技术已基本成熟,在先进的工业国家已取得很大的发展与应用。我国的科技工作者经过两个五年计划的努力,激光加工技术也得到很大的发展,已到了逐步推广应用阶段。但至今国内还没有一本对各种高功率激光加工工艺及加工用激光器论述比较全面而又实用的书籍。作者从1979年开始从事激光加工的研究,在学院内创办了激光加工研究室,是国内从事激光加工研究最早的单位之一。曾承担国家“六五”、“七五”、“八五”攻关项目、国家自然科学基金项目、天津市项目及国家开放实验室项目,并培养了六名硕士研究生。我们在为几届研究生讲授激光加工课程的基础上,1987年编印了《高功率激光加工及其应用》教材,尔后又收集了大量资料,承天津科学技术出版社高瞻远瞩,以科技兴国为重,使之本书得以出版,本人已届退休之年,理应把收集的资料和研究心得写出来以飨来者,才得全力编写此书。

本书结合本人十几年的研究心得,选编了国内外最新的研究成果,包括1992年1月召开过的全国激光加工学术交流会资料。由于激光加工技术正在迅速发展,并未定型,为了给读者提供最新的信息、概念并开阔视野与思路,在论述各种激光加工技术时,先介绍基本的成熟的技术,再介绍各种最新的研究成果。其中关于激光表面强化技术,是国内外研究的热点,近年来研究成果和发表文章很多,分作三章(第七、八、九章)作了详细论述;仅激光熔覆一章,就有四万多字的篇幅,而国外的激光加工书籍中一般只有一个小节,这构成本书的一个特色。

从事激光加工的技术人员,必需对所使用的激光器有比较深入的了解,国外激光加工书籍一般在这方面论述过简,本书特设第二、三、四、五章,比较详尽地介绍了激光加工用的基本手段——激光器及测试仪器。突出高功率CO₂激光器和YAG激光器,同时又介绍了加工用激光器的最新发展。这四章由我的研究生钟敏霖讲师编写。他从事激光器的操作、维护、检修与改进工作已有八年之久,积累了丰富的经验,并收集了大量的资料。其他各章均由本人编写,并对全书作了统一的校订。希望本书的出版能对我国激光加工事业的发展有所裨益,并诚恳地欢迎批评指正。

阎毓禾

1992年3月

目 录

前 言	(1)
第一章 当代激光加工业发展综述	(1)
第二章 激光物理基础	(3)
第一节 激光的产生所涉及的物理概念	(3)
第二节 激光产生机理与激光模式	(5)
第三节 激光器基本构成	(7)
第四节 CO ₂ 激光的激发机理	(10)
第五节 YAG 激光的激发机理	(13)
第六节 He—Ne 激光的激发机理	(13)
第七节 激光的特性	(14)
第三章 高功率 CO ₂ 和 CO 气体激光器	(17)
第一节 CO ₂ 激光器的激励技术	(17)
第二节 CO ₂ 激励技术的最新发展——Macken、射频、微波激励	(20)
第三节 CO ₂ 激光器的效率	(22)
第四节 扩散冷却准封离型 CO ₂ 激光器	(24)
第五节 轴向流动型 CO ₂ 激光器	(26)
第六节 横向流动型 CO ₂ 激光器	(28)
第七节 螺旋流动型 CO ₂ 激光器	(31)
第八节 横流圆筒结构 CO ₂ 激光器	(31)
第九节 CO ₂ 激光气体再生技术和无氢激光器	(32)
第十节 高功率 CO 激光器	(34)
第四章 高功率 YAG 激光器、准分子激光器和碘激光器	(37)
第一节 固体 YAG 激光器概况	(37)
第二节 棒状 YAG 激光器及热透镜效应	(39)
第三节 片状固体激光器	(41)
第四节 管状固体 YAG 激光器	(44)
第五节 固体激光器的展望	(45)
第六节 YAG 激光的光纤传输	(45)
第七节 准分子激光器	(46)
第八节 高功率碘激光器	(49)
第五章 高功率激光束参数的测量	(51)
第一节 激光功率测量基础	(51)
第二节 激光功率的全光斑测量法	(51)
第三节 激光功率的部分光斑测量法	(54)
第四节 激光束空域参数测量基础	(56)
第五节 光束模式和直径的烧痕测量法	(58)
第六节 光束直径的 90% 温升时间测量法	(58)

第七节	光束模式和直径的转针扫描测量法	(59)
第八节	光束模式和直径的空心针孔扫描测量法	(61)
第九节	光束模式的滚珠扫描测量法	(62)
第十节	光束模式的单元孔扫描测量法	(63)
第十一节	光束发散角的测量	(64)
第六章	激光加工基础	(66)
第一节	激光束的偏振、传输和聚焦	(66)
第二节	激光与物质的相互作用	(72)
第三节	激光加热时温度场的理论计算	(74)
第四节	激光加工用光学元件	(78)
第五节	激光加工机发展现状	(82)
第六节	激光危害与防护	(85)
第七章	激光相变硬化	(90)
第一节	概述	(90)
第二节	光束处理技术	(91)
第三节	工件表面的预处理	(96)
第四节	激光相变硬化的工艺参数	(99)
第五节	激光相变硬化后表面的性能	(100)
第六节	实际应用举例	(107)
第八章	激光表面熔凝处理(一)——激光熔化淬火与激光合金化	(112)
第一节	激光熔化淬火	(112)
第二节	材料表面局部熔化后的形貌及其形成机理	(118)
第三节	激光合金化	(120)
第九章	激光表面熔凝处理(二)——激光熔覆	(128)
第一节	合金粉末	(128)
第二节	粉末加入方法	(131)
第三节	激光熔覆工艺过程参数的热计算	(132)
第四节	激光熔覆层合金元素的均匀化问题	(136)
第五节	激光熔覆过程中的气孔、裂缝防止及稀释度问题	(137)
第六节	钴基合金的激光熔覆	(140)
第七节	镍基合金的激光熔覆	(148)
第八节	铁基合金的激光熔覆	(152)
第九节	金属陶瓷的激光熔覆	(156)
第十节	其他金属的激光熔覆	(162)
第十一节	激光熔覆的应用与展望	(164)
第十章	激光非晶化	(168)
第一节	金属非晶化研究简史	(168)
第二节	非晶态金属的性质及应用前景	(169)
第三节	激光非晶化的优点	(171)
第四节	过冷液态合金的 TTT 转变曲线及临界冷却速度	(172)
第五节	瞬时加热冷却过程中熔化层情况分析	(173)
第六节	瞬时熔化淬火的热力学和动力学研究	(175)
第七节	脉冲激光非晶化	(177)

第八节	连续激光非晶化	(178)
第九节	扩大非晶态面积的进展	(179)
第十一章	激光切割	(185)
第一节	概述	(185)
第二节	激光切割的分类及机理	(186)
第三节	激光切割的工艺参数及其规律	(189)
第四节	激光切割中的两个重要技术问题	(193)
第五节	现代激光切割技术水平	(195)
第六节	激光切割应用举例	(197)
第七节	激光切割技术的新发展	(199)
第十二章	激光焊接	(205)
第一节	概述	(205)
第二节	热导焊	(206)
第三节	深熔焊	(208)
第四节	激光焊接头型式	(219)
第五节	激光焊的接头质量	(219)
第六节	激光焊与其他焊接方法的比较	(221)
第七节	各种金属的激光焊	(222)
第八节	关于等离子焰的控制及匙孔形状的研究现状	(223)
第九节	偏振对深熔焊的影响	(226)
第十节	激光焊接技术的新发展	(227)
第十三章	其他激光加工方法	(234)
第一节	激光切削	(234)
第二节	激光冲击硬化	(236)
第三节	印刷品的 CO ₂ 激光快速烘干	(238)
第四节	激光制造金属粉末	(238)
第五节	准分子激光加工	(239)

第一章 当代激光加工业发展综述

自从 1960 年第一台激光器问世以来,已经发展成世界范围的激光产业。1990 年国际激光市场销售总额 10.25 亿美元。从事激光工作的科学家和工程师 1982 年已有 30650 人^[1],1989 年仅美国就已超过 10 万人^[2]。

激光加工是激光应用的首要领域,国外激光加工产值占激光总产值的 24.7%^[3]。激光加工工业兴起于 70 年代,西方销售额增长很快,1970 年为 600 万美元,1980 年为 7000 万美元,1985 年为 2.8 亿美元,当时年平均增长率 20% ~ 25%,已形成一个新兴的产业^[4]。1991 年为 2.9 亿美元^[5]。

据美国依利诺伊州工学院激光研究所 1983 年发表的调查资料^[6],当时美国拥有激光加工用激光器约 6000 台,分布于汽车制造、空调器、汽轮机、铁路、家用电器、泵与压缩机、宇航、玻璃制造、农业机械、电子、计算机等部门。其中切割占 44%,焊接 48%,表面处理 8%。并预期到 2000 年将增长 5 倍,达 35000 台,主要发展领域将为激光表面处理。

1987 年 J. P. Rutt 认为当时全世界约有激光加工设备 8000 台,并以每年 2000 台的速度增长。一般能提高效率 8 ~ 20 倍,投资回收期限一般在一年以内,最长者五年^[7]。

美国激光加工业发展最早,曾独占世界激光市场,美国激光器销往日本和欧洲。80 年代日本迎头赶上,到 1988 年出现逆转,日本反而向美国出口激光器,形成美日两家垄断竞争的局面,两国拥有世界市场的 75%^[8]。欧洲也急起直追,德、法、英等国均在大力发展。欧洲共同体搞了几个发展计划:如 BRITE 计划,投资 185 亿美元;EUROLASER 计划,投资 110 亿美元以上^[9]。欧共体所占世界市场比重,1988 年为 27%,1990 年便上升到 35%。1990 年美国占 45%,日本及太平洋地区占 20%^[5]。

1990 年世界市场上材料加工用 CO₂ 激光器销售台数比 1989 年增加了 14%,达 3050 台,销售金额增长 19%,达 1.6 亿美元。应用的主要领域是金属板的切割和焊接,特别是汽车工业中应用需求量日益增长。材料加工用固体 YAG 激光器增长 18%,达 2070 台,销售金额增长 20%,达 0.72 亿美元,应用领域主要是汽车制造业和电子工业中的焊接、钎焊及打标记,增长迅速。材料加工用的准分子激光器增长 13%,达 90 台,销售金额增长 24%,达 990 万美元,日本已把准分子激光器推为半导体加工的关键设备^[5]。

在激烈的市场竞争中,几个主要工业国的政府都采取了有力措施促进本国激光工业的发展。除上述欧共体搞的发展计划外,美国 1984 年前后每年在发展激光工业上拨款 20 ~ 25 亿美元,日本通产省发展了激光柔性加工系统,1977 年至 1984 年用了 8 年时间,投资 130 亿日元,很快把高功率激光器发展起来了。日本新技术开发团委托石播公司研制 3kW CO 激光器,投资 1 亿 2 百万日元,限期 3 年,现已成功,并已有 7kW CO 激光器样机^[4]。

前苏联在 1982 年已拥有百余家研究机构,2000 多名科技工作者,发展了自己的千瓦级激光器,特别是千瓦级无氮 CO₂ 激光器^[10] 引人注目。他们也进口美国激光器而无产品进入世界市场。

我国激光工业发展速度也很快。早在 1976 年,长春光机所与第一汽车制造厂等单位合作

发展了SJ—2500型500W直管式数控激光切割机,用于红旗轿车车身薄板的切割。经过两个五年计划的努力,1990年我国激光总产值1.8亿元,从事激光工作的科技人员7300人。激光加工业产值占11.6%,比国外低(国外占24.7%),预示激光加工业还须大力发展。近年激光加工业产值增长情况是:1988年为308.5万元,1989年727.3万元,1990年为1270.5万元,比上年增长12.7%^[11]。我国政府也给予很大的重视,1983年国家科委领导组成全国激光热处理攻关协作组,并组织研制了2kW、5kW及10kW CO₂激光器。“七五”规划中又扩大为激光加工,包括焊接、切割、打孔等多种激光加工。我国千瓦以上的激光加工系统,1989年有49台,1990年为87台^[12];国内从事激光加工研究开发的单位有30多家,实际在使用的激光加工生产线有九条,并在北京、上海、武汉、天津等城市建立了激光加工中心。

改革开放以来,1985年至1990年5年间,国内先后有16个单位从国外引进各种激光器和加工机29台,其中只有6台作为样机用于研制产品,国内现尚无全部国产化的实用型激光加工整机^[13]。

我国的激光加工业起步并不晚,但发展速度却无法与日本相比,值得我们广大的激光加工科技工作者深思。经过两个五年计划的努力,激光加工技术已经到了逐步推广应用的时候了。十分可喜的是政府已经大大加强了“科技是第一生产力”的宣传教育,并以高科技大力振兴大中型企业。我们希望,各工业部门的领导和科技人员都能了解激光加工技术,都能设法利用这项高新技术来发展自己的企业。我们更希望从事激光加工的科技人员,努力把国产的激光器质量和加工技术再提高一步,经受住生产的考验。并且让我们的激光加工业走向世界。

参 考 文 献

- [1] 国外激光产业发展概况“推进激光技术成果工业化及其应用资料汇编”,国家科委,1987年3月
- [2] 姚建铨,美国激光产品及产业情况简介,“激光与光学”,1989年12期
- [3] 张育川,从1990年全国激光产品产值统计看我国激光市场发展方向,“激光集锦”,1991,Vol. No. 5 P. 1.
- [4] 国外激光加工现状,同[1],P. 27
- [5] 1991年激光器市场评论与展望,“激光集锦”,1991Vol. No. 3. P. 3.
- [6] F. D. Seaman Material-working Lasers in The United States. Proc Conf of 3rd International Colloquium on welding and melting by Electrons and Laser Beam. Sept 1983. Lyon. France.
- [7] J. P. Rutt. Applying Industrial Lasers for Improved Manufacturing Productivity. SPIE Vol 744, “Lasers in motion for Industrial Applications 1987.
- [8] D. A. Belforte. Industrial Laser in the USA and Japan;perspective 1989. Proc. conf. Lasers in Manufacturing. 1989.
- [9] W. M. Steen European Laser Science-An Update. Proc. Conf ICALEO' 86
- [10] Мощные Газоразрядные CO₂-Лазеры и их Применение в Технологии. Лкабемия Наук СССР. 1984.
- [11] 光学光电子信息,1991年9月13日
- [12] 邓树森,激光加工技术近况与发展,第二届全国激光加工学术交流会论文集,1992年1月
- [13] 邓鸿林,我国工业CO₂激光器及加工机产业概况与发展对策,中国光学会通讯 1990年2月13日

第二章 激光物理基础

第一节 激光的产生所涉及的物理概念

激光的产生涉及到原子物理理论的一些基本概念。

一、原子的能级和跃迁

原子是由带正电的原子核和核外一定数目的运动电子所组成的。电子可以在核外不同的分离轨道上绕原子核运动,这些在各个轨道上运动的电子与原子核共同确定了原子的能量(电子的动能和电子与核间的位能)。电子分布于离核最近的一些轨道时,原子的总能量最低,称原子处于基态;由于外界作用使电子重新分布于离核较远的外层轨道时,原子的总能量较高,称原子处于激发态(图 2-1)。各种不同的能量状态称为能级,原子可能具有的总能量值不是连续分布的,而是一系列分立的数值,故其能级的分布也是分立的。

电子在核外的分布不是一成不变的,当原子受到外界能量作用时,电子的分布就会发生变化,原子的能量也随之变化。原子从一种能量状态变化到另一种能量状态的过程叫做跃迁。原子跃迁时的能量变化 ΔE 以光波的形式发射或吸收。

$$\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \tag{2-1}$$

式中 c ——光速
 λ ——波长
 ν ——频率

h ——普朗克常数, $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$

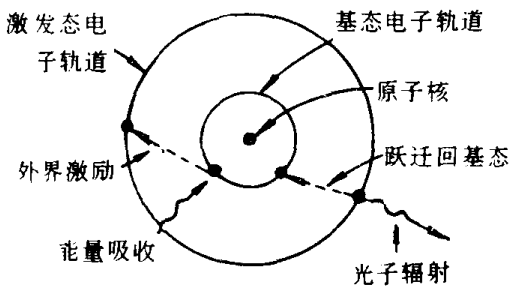


图 2-1 原子的结构和能量变化

原子的能级图表示原子所具有的各种能量状态和可能的跃迁变化(图 2-2)。同理,离子、分子等粒子也都有各自的能级图。

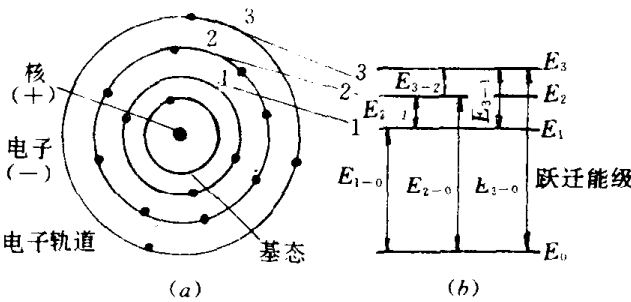


图 2-2 电子轨道与能级图
(a) 核和电子轨道 (b) 能级图

二、自发辐射

原子总是趋向于回复到能量最小的基态,基态是一种稳定状态。处于激发态的粒子能量较大,是很不稳定的,它可以不依赖于任何外界因素而自动地从高能级跳回低能级,并辐射出频率为 ν 的光波:

$$\nu = (E_2 - E_1)/h \tag{2-2}$$

式中 E_2 —— 高能级能量
 E_1 —— 低能级能量

这一过程称为自发辐射(图 2-3a)。

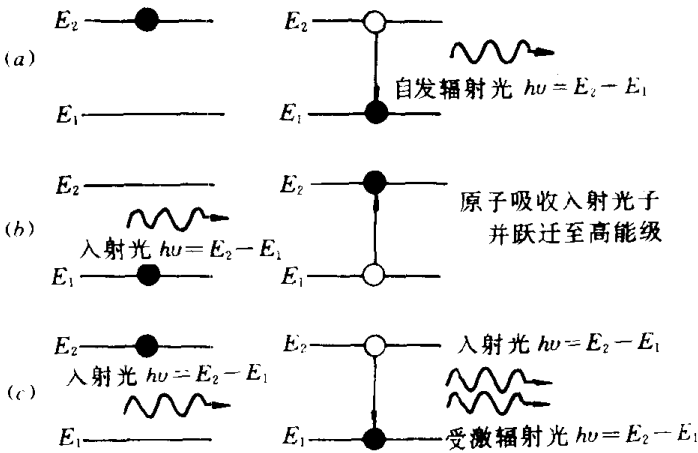


图 2-3 原子的自发辐射、受激辐射和受激吸收
(a) 自发辐射 (b) 受激吸收 (c) 受激辐射

自发辐射是普通光源的发光机理。由大量粒子组成的体系,其中各粒子的自发辐射是相互独立的,因而整个体系的自发辐射光的波长和相位是无规则分布的,其传播方向和偏振方向也是随机的,自发辐射光是一种非相干光。

三、受激吸收

处于低能级 E_1 的粒子,在频率为 ν 的入射光(ν 满足 2-2 式)诱发下,吸收入射光的能量 $h\nu$ 而跃迁到高能级 E_2 的过程称为受激吸收(图 2-3b)。

四、受激辐射

处于高能级 E_2 的粒子,受到频率为 ν 的入射光(ν 满足式 2-2)的诱发,辐射出能量为 $h\nu$ 的光波而跃迁回低能级 E_1 的过程称为受激辐射(图 2-3c)。由受激辐射产生的光同入射光一模一样,即它们具有完全相同的频率、相位、传播方向和偏振状态,因此受激辐射具有光放大作用。

受激吸收和受激辐射概念是由爱因斯坦首先提出来的,是激光产生的理论基础。

应当指出,受激辐射与自发辐射是两种本质不同的物理过程。自发辐射的几率只与原子本身有关,而受激辐射的几率不仅与原子性质有关,还与入射光频率、光强等因素有关,而且它们发出的光的性质也不相同,这便是激光区别于普通光源的根本原因。

五、粒子数反转

通常情况下,物质体系处于热力学平衡状态,受激吸收和受激辐射同时存在,其吸收和辐射的总几率取决于高低能级上的粒子数。而平衡态下任意两个高低能级上的粒子数分布服从玻尔兹曼统计规律:[1]

$$n_2/n_1 = e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}} \quad (2-3)$$

式中 n_2, n_1 —— 高低能级上的粒子数

T —— 平衡态时的绝对温度

k —— 玻尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/}^\circ\text{C}$

E_2, E_1 —— 高低能级能量

显然,高能级能量 E_2 大于低能级能量 E_1 ,即 $E_2 - E_1 > 0$ 则总有 $n_2 < n_1$ 。因而在热平衡状态下,体系高能级上的粒子数恒少于低能级上的粒子数(图 2-4)。

所以,在平衡状态时,对于入射到粒子体系的相应频率的外界光,体系受激吸收的几率恒大于受激辐射的几率,体系对光的吸收总是大于发射,体系呈吸收状态,对光起衰减作用。吸收了外界光子而跃迁到高能级的粒子再以自发辐射的形式将能量消耗掉。因此,在通常情况下,我们只见到原子体系的光吸收现象,而看不到光的受激辐射现象。

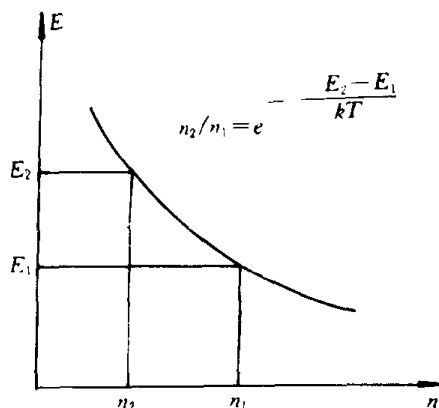


图 2-4 粒子数按能级的玻尔兹曼分布

激光器中利用气体辉光放电、光辐射等手段激励粒子体系,使其突破通常的热平衡

状态,即将基态上的粒子有选择地抽运到某一个或几个高能级上去,使这些高能级上的粒子数大大增多,从而超过低能级,达到 $n_2 > n_1$,这种状态称为粒子数反转。此时,体系的受激辐射几率超过受激吸收几率,受激辐射占优势,对外界入射光的反应效果是总发射大于总吸收,体系具备放大作用,通过该体系的光将会得到放大,这时我们称体系已经被激活。因此,粒子数反转是实现激活和光放大的必要条件。由受激辐射增加的光的状态(频率、传播方向、偏振等)同入射光完全相同,这种放大又称相干放大,光强的放大率取决于粒子数的反转程度。

第二节 激光产生机理与激光模式

一、激光振荡

实现粒子数反转的工作物质具有光放大作用,经工作物质放大而射出的光强与入射光强之比称为光放大系数,光强很弱时的放大系数叫小信号增益系数,用 G^0 表示。工作物质内部也存在光损耗,单位长度的损耗用损耗系数 α 表示。激活物质内沿 Z 轴的光放大行为可表示为[2]

$$I(Z) = I_0 e^{(G^0 - \alpha)Z} \quad (2-4)$$

式中 I_0 —— 初始光强

$I(Z)$ —— 传播到 Z 处的光强

由于光放大是由高能级粒子向低能级受激辐射跃迁而产生的,受激辐射要消耗高能级粒

子数,因此,光强的增大是以粒子数反转值的减少为代价的。光强 I 越大,受激跃迁掉的高能级粒子就越多,粒子数反转值就越少,光的放大就越慢,增益系数也就变小,这种现象称为增益饱和。含有增益饱和效应的放大系数 G 可表示为光强 I 的函数,即

$$G(I) = G^0 / (1 + I/I_s) \quad (2-5)$$

式中 I_s ——饱和光强

由于自发辐射,激活物质内总存在微弱光强 I_0 。起初,光强 $I(Z)$ 按小信号放大规律(式 2-4) 增大,但随着 $I(Z)$ 的增大将出现增益饱和和效应,增益系数将按式(2-5) 减少, $I(Z)$ 的增大也逐渐变慢。最后当 $G(I) = \alpha$ 时, $I(Z)$ 不再增加而达到一个稳定的极限值 I_m ,即

$$G(I_m) = \frac{G^0}{1 + I_m/I_s} = \alpha \quad (2-6)$$

$$I_m = (G^0 - \alpha)I_s/\alpha \quad (2-7)$$

I_m 只与放大物质本身的参数有关,而与初始光强 I_0 无关。也就是说,不管初始光强 I_0 多么微弱,只要激活物质足够长,就能不断得到放大,总能形成确定大小的光强 I_m ,产生激光振荡和输出。

激光能实际形成和增大的条件为:

$$I_m = (G^0 - \alpha)I_s/\alpha \geq 0 \quad (2-8)$$

$$\text{即} \quad G^0 \geq \alpha \quad (2-9)$$

当 $G^0 = \alpha$ 时,光强维持在 I_0 的微弱水平上;只有当 $G^0 > \alpha$ 时,光强才能增大,达到极限光强 I_m 。 $(G^0 - \alpha)$ 值越大, I_m 就越大,输出功率就越高。

二、激光模式

激光是一种电磁波。由激活物质两端的反射镜组成的光腔将对电磁场加上一定的限制,根据电磁场理论,一切被约束在空间有限范围内的电磁场都只能存在于一系列分列的特征状态(称为本征态)之中,每一个本征态都有自己的振荡频率和空间分布。通常将光学谐振腔内可能存在的电磁场的本征态称为光腔的模式,激光模式也就是光腔内可区分的光波的状态。只要腔的结构确定,腔内振荡模式的特征也就随之确定。

光波场的空间分布可分解为沿腔轴方向的分布和沿垂直于腔轴的截面内的分布。沿轴向的场分布称为纵模,垂直轴向的平面上的场分布称为横模,光腔模式是横模和纵模的组合。

横模用代表横向电磁波的 TEM_{mn} 表示, m 表示沿辐角 φ 方向光场经过零值的次数, n 表示沿半径 r 方向光场过零值的次数。 m 、 n 值也对应于横模的传播方向, m 、 n 较小的模与腔轴构成的夹角较小,因而 m 、 n 也表征横模发散角的大小。图 2-5 为几种横模光斑的强度分布。 TEM_{00} 模称为基模,它的发散角最小,能量最集中,能聚焦成极高的功率密度,在激光加工中最为有利。其它 m 、 n 值较大的模称为高阶模。 TEM_{01} 为环形模,光场呈环状,中心场强为零。环形模的发散角比较小,有些高功率 CO_2 激光器输出环形模。高阶模的模半径大,发散角也大,能量不集中,不利于激光切割或焊接。

腔内光场的横向分布可用高斯函数描述^[3]:

$$E(X, Y, Z) = \frac{E_0}{W(Z)} e^{-\frac{X^2 + Y^2}{W^2(Z)}} \quad (2-10)$$

式中 E_0 —— $X = Y = Z = 0$ 处的光场强度

$W(Z)$ —— Z 处的半束半径

$W(Z)$ 最小时的位置即为坐标原点,激光输出光束也常称为高斯光束。

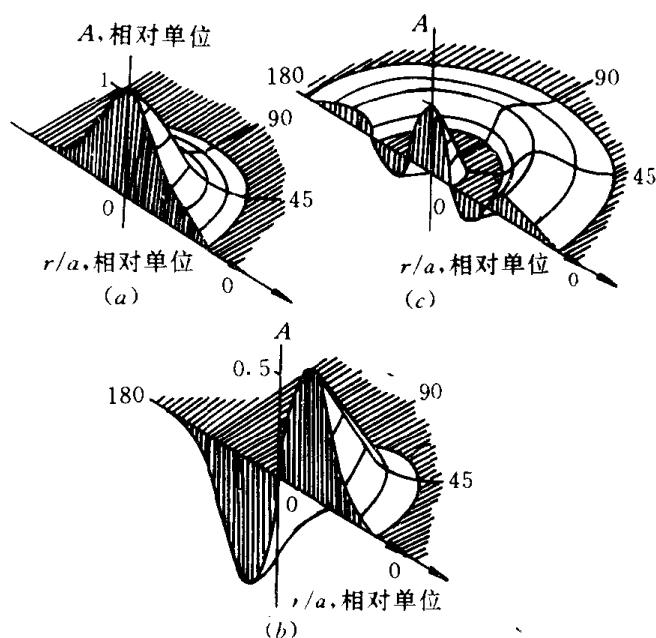


图 2-5 共焦谐振腔反射镜上,三种振荡模的相对光场振幅分布图
(a)TEM₀₀ 振荡模 (b)TEM₀₁ 振荡模 (c)TEM₀₂ 振荡模

纵模也就是光腔内的驻波场分布,应满足谐振条件:

$$L = q \frac{\lambda_q}{2} \quad q = 1, 2, 3, \dots \quad (2-11)$$

式中 L ——腔长
 q ——半波长数

凡是满足谐振条件因而能在光腔内稳定存在的驻波场就是一种纵模,每种纵模用 q 标记。纵模的谐振波长和频率由下式决定

$$\lambda_q = \frac{2L}{q}, \quad \nu_q = q \cdot \frac{C}{2L} \quad (2-12)$$

第三节 激光器基本构成

激光器是产生激光输出的实际装置,它使工作物质激活,产生受激放大作用,并使受激辐射维持,在腔内形成持续的振荡,最初由自发辐射产生的微弱光经过选择性受激放大,沿光轴的光得到优先强化,光强不断积累增大,当超过腔内损耗阈值时,部分振荡光能耦合输出便成为激光。

任何激光器都由工作物质、激励系统和光学谐振腔三个基本部分组成(图 2-6)。

一、工作物质

工作物质是激光器的核心部分,它是一种用来实现粒子数反转和产生光的受激辐射作用的物质体系,可以是固体(如晶体、玻璃等)、气体(原子气体、离子气体、分子气体等)、半导体及液体(有机或无机液体)等材料。

CO₂ 激光器的工作物质由 CO₂、N₂、He(有时还有 Xe、He、Ar、H₂O) 等气体按一定比例混合而

成,其中 CO_2 是激活分子,通过 CO_2 分子振转能级的跃迁而产生激光。其它气体都是辅助元素,用于实现和维持 CO_2 的粒子数反转,最大限度地提高激光器的输出功率和效率。

$\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器的工作物质是掺有钕离子的钇铝石榴石晶体($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$)。掺杂的钕离子是激活离子,起受激辐射作用,而晶体则作为基质。

激光工作物质按激发过程所涉及的能级结构可分为三能级系统和四能级系统。

三能级系统包括泵浦带、上能级和基态三个能级,其特点是激光跃迁的下能级是基态。因此,为了实现粒子数反转,就必须把一半以上的工作粒子激励到激光跃迁上能级上去,产生激光作用所需要的外界激励阈值水平较高(图 2-7 左)。红宝石激光物质就是典型的三能级系统。

四能级系统包括泵浦带、激光上能级、激光下能级和基态,其特点是激光下能级在基态之上足够高的位置,通常情况下其粒子数几乎为零,因此只要上能级存在粒子,就容易实现粒子数反转,产生激光作用所要求的外界激励阈值水平较低,系统的激光转换效率比三能级系统高。(图 2-7 右)。 CO_2 、 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 和 He-Ne 都是四能级工作物质。

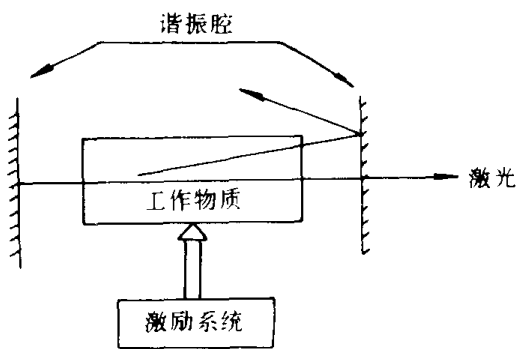


图 2-6 激光器的基本组成

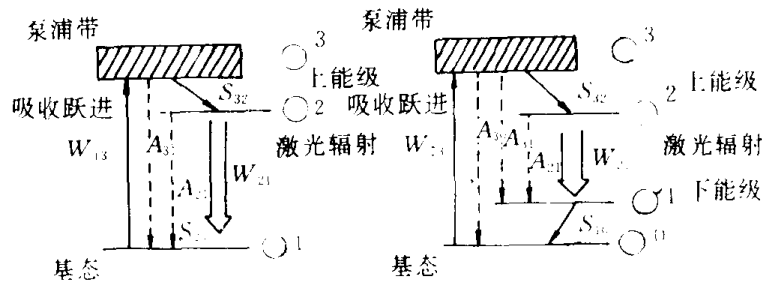


图 2-7 激光工作物质的能级结构

二、激励系统

激励系统是提供激励能源的装置,用于将下能级粒子输送到上能级上去,使得工作物质实现粒子数反转。

常用的激励方式有气体放电激励、光学激励、化学反应激励、热激励和核能激励等。

气体激光器常采用气体放电激励。气体在辉光放电时,部分气体粒子电离后产生的电子在高压激励电场作用下获得较大的动能,电子再与气体粒子碰撞将能量转移给粒子使其激发到高能级,从而在某对特定的能级间实现粒子数反转。或者,电子先与辅助气体粒子碰撞使其激发,激发态的辅助气体粒子再与工作粒子碰撞发生能量转移,将工作粒子激活。

实际的气体激光器可用脉冲放电、直流放电、交流放电和高频放电等多种方式来激励,亦可用外部电子束直接注入气体工作物质来激励。放电激励装置由适当结构的放电电极和电源设备等组成。

固体和液体激光器采用光学激励(或称光泵),即利用外界光源发出的光辐照工作物质使其实现粒子数反转。光学激励系统由光源和聚光器组成,光源一般用高压氙灯,氦灯或卤—钨灯。这些光源一般发射连续光谱,而工作物质则对光谱区中的某些谱线或谱带有较强的吸收,使得与这些吸收谱线或谱带对应的能级获得粒子数积累。聚光器用来将光源发出的沿空间各个方向的光集中照射到工作物质上,提高光源的激发效率。

三、光学谐振腔

光学谐振腔由两块具有特定曲率半径的反射镜相隔一定的距离共轴放置而组成,工作物质置于中间,其中一块为全反射镜,另一块为部分反射镜,作为输出窗口。

1. 光腔的作用

适当结构的光学谐振腔对激光的产生是必不可少的,光腔具有正反馈和选模两个重要作用。

正反馈是指光腔使光波在腔内来回反射放大,建立和维持自激振荡。受激辐射放大能力是与激活物质的粒子数反转量和激活长度成比例的,只要激励系统提供足够的反转粒子数,即泵浦系统将粒子抽运到上能级的速率足够大则激活长度越长,受激辐射放大的光就越强。腔内最初的辐射信号是由自发辐射产生的,光腔两端的反射镜使得沿光轴方向和近轴方向的光在腔内多次来回通过激活物质,每次都得到受激放大,相当于极大地增加了激活物质的长度,光强得到雪崩式增大,一直到增益饱和为止(图 2-8)。正反馈是激光高亮度的重要原因。

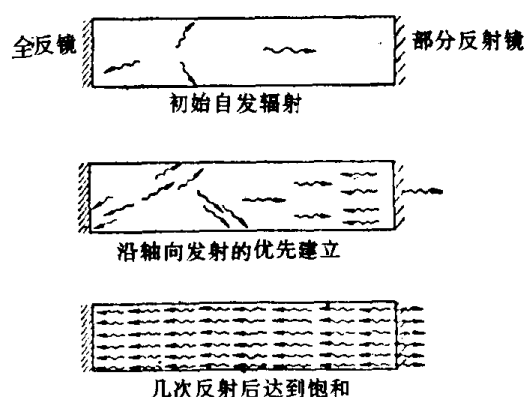


图 2-8 光腔的正反馈和选模作用

选模作用是指光腔对腔内振荡模式的限制和选择。在由两个端面反射镜组成的

开放式腔中,从几何光学上看,只有那些轴向的或近轴的模式才能在腔中多次往返得到放大,其它离轴的模式会逸出腔外而消失。从物理光学上看,只有那些满足多光束干涉条件(式 2-11)的模式才能形成稳定的驻波振荡并得到增益,其他模式则被淘汰。这相当于光腔只选择那些与腔参数相匹配的模式,而抛弃其余不匹配的模式。激光束的高方向性、高单色性和高相干性正是来源于受激辐射的特征和腔的选模作用。

2. 光腔的类型及稳定性

光腔中的反射镜可以是平面的,也可以是球面的,由其曲率半径 R 描述,不同 R 的反射镜以不同的间距 L 放置就组成各种类型的谐振腔。光腔可用两个参量标志:

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1}, g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} \quad (2-13)$$

式中 L ——腔长

R_1, R_2 ——两个反射镜的半径

如果光腔中的近轴模能在腔内多次传播而不逸出腔外,其几何偏折损耗几乎为零,则称为稳定腔。相反,如果近轴模经少数几次传播就逸出腔外,其几何偏折损耗很高,则称为非稳腔。谐振腔的稳定条件为^[4]:

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1 \quad (2-14)$$

由坐标轴 $g_1 = 0, g_2 = 0$ 和双曲线 $g_1 g_2 = 1$ 的两支曲线围成的区域属于腔的稳定工作区,其它区域是非稳区。落在稳定区内的腔为稳定腔,落在非稳区内(即 $g_1 g_2 < 0, g_1 g_2 > 1$) 的腔为非稳腔(图 2-9)。

稳定腔的优点是损耗极低,近轴光线的几何偏折损耗为零,而衍射损耗通常也很小,故稳定腔的振荡阈值低,极限光强高,使用很普遍。平凹腔(由平面镜和凹面镜组成)是稳定腔中用得最多的,绝大多数的工业激光器都采用平凹腔(图 2-10),平凹腔可输出基模或高阶模光束。稳定腔的缺点是腔内振荡模式的模体积比较小,没有充分利用激活区内的反转粒子数。

有些高功率 CO_2 激光器采用非稳腔(图 2-11),腔内振荡模式的体积大,能充分利用反转粒子数。非稳腔利用光波的横向几何偏折作为激光输出,得到 TEM_{01} 环形模,其发散角小,光束质量良好。

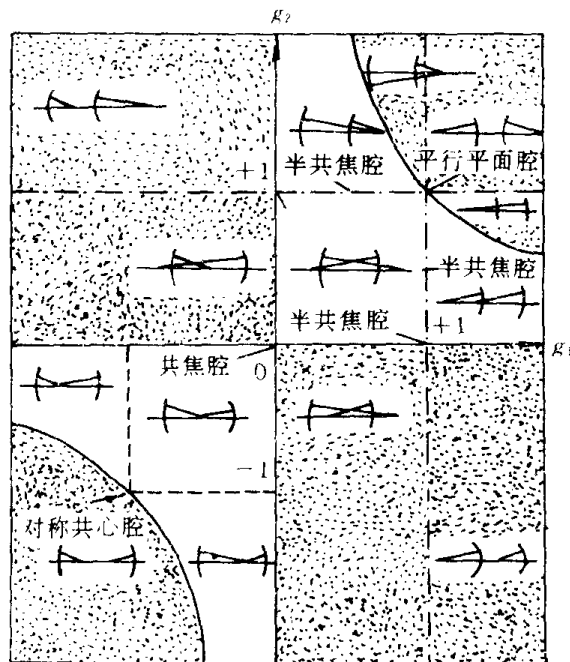


图 2-9 光腔的稳区图

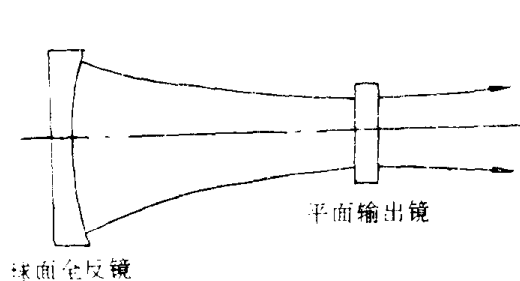


图 2-10 平凹稳定腔

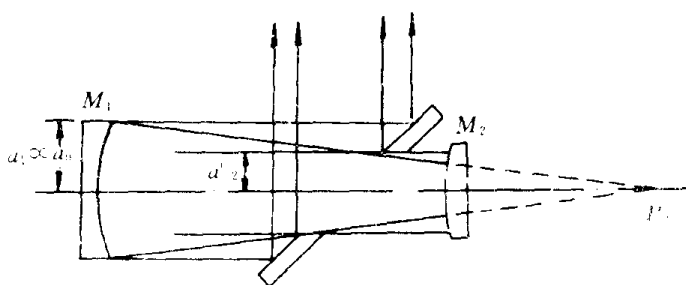


图 2-11 非稳腔

第四节 CO_2 激光的激发机理

激光加工中最常用的激光为 CO_2 激光和 YAG 激光,两者均为红外不可见光。实际使用时,