

实用激光加工

〔日〕浜崎正信 著



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书较系统地论述了激光的原理和特性,激光器件,侧重介绍了材料加工中常用的CO₂激光器和YAG激光器。特别是对表面处理(表面硬化、表面均匀化、包覆和喷涂、表面合金化及表面重熔)、焊接、切割、微测、划片及打孔等激光加工的特性、工艺技术、设备、质量保证、劳动保护及加工实例作了详细介绍。本书内容具体而实用,可供从事激光加工研究和应用的工程技术人员阅读,对有关的大学师生也有一定的参考价值。

实用レーザー加工

浜崎正信

テック出版株式会社

1986年

* * *

实用激光加工

〔日〕浜崎正信 著

陈敬之 译

关桥 蔡怀福 校

*

责任编辑:武江 责任校对:孙志筠

封面设计:刘代 版式设计:胡金瑛

责任印制:卢子祥

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本787×1092¹/₃₂·印张6³/₈·字数139千字

1992年2月北京第1版·1992年2月北京第1次印刷

印数0,001—2,020 定价:6.50元

*

ISBN 7-111-01426-X/TG·352

DV85/20
原 序

自从T·H·梅曼在1960年研究出第一台激光器以来，激光技术获得了惊人的进展，名副其实地成了本世纪的最大发明之一。当今激光技术的发展远远超过了人们原来的预想。在激光的应用领域中，激光加工所占的比例很大，约为30%。可以肯定，这一比例将来还会不断上升。

激光加工的范围很广。本书因篇幅所限，故阐述方法只能在工艺方面以焊接和切割为主，热处理、打孔及钎焊为辅，在材料方面以金属材料为主，非金属材料为辅。

这些加工领域所使用的是二氧化碳激光和钕铝石榴石(YAG)激光。有关激光技术的论文虽然很多，但都是研究和实验报告。对于有一定激光知识的人姑且不说，对于想要学习而希望通过书本了解激光技术的人来说，阅读这些论文就难免有隔靴搔痒之感。

本书阐述了激光加工的原理、装置及其应用，这对于从事激光加工的技术人员和设备的研制者是不可缺少的。充分论述所有激光加工技术需要有广泛的学识，而本人才疏学浅，难以做到。本书若能对深入了解激光技术的读者起到参考作用，我当感到荣幸。

作 者

1986年2月

目 录

第一章 激光技术发展的历史和现状	1
1.1 激光的发现源于量子放大器	1
1.2 研制的新型激光器	2
1.3 激光器的大功率化和高效率化	6
1.4 日本和美国激光器研制的差别	7
1.5 激光加工的展望	10
第二章 激光原理	13
2.1 激发态	13
2.2 光泵浦式振荡	15
2.3 电子及原子碰撞式振荡	19
2.4 CO ₂ 激光原理	20
2.5 其他激光的原理	22
2.5.1 激态复合物激光	23
2.5.2 化学激光	24
第三章 激光的特性	26
3.1 相干性	26
3.2 谱线展宽	27
3.3 振荡模式	28
3.4 方向性	30
3.5 聚焦性	32
3.6 输出波形	33
3.7 激光焊接和切割与现有方法的比较	36
3.7.1 焊接	36
3.7.2 切割	38

第四章 激光光学元件	40
4.1 透射型元件	40
4.2 全反射型元件	44
4.3 表面镀层	45
4.4 透镜焦距的选择	47
4.5 偏振镜	49
4.6 护目镜	51
4.7 光导纤维(光纤)	53
4.7.1 光纤的发展	53
4.7.2 光纤的类型	53
4.7.3 石英光纤	56
4.7.4 红外光纤	57
4.7.5 使用光纤的优点	60
第五章 激光装置	64
5.1 各种 CO_2 激光器	64
5.1.1 CO_2 激光器	64
5.1.2 纵向流动电激励 CO_2 激光器	64
5.1.3 横向流动电激励 CO_2 激光器	66
5.1.4 横向激励大气压 CO_2 激光器	66
5.1.5 交流无声放电 CO_2 激光器	67
5.1.6 气动激光器	68
5.2 激光器的功率与结构	69
5.2.1 激光束的折叠与功率	69
5.2.2 稳定谐振腔与非稳定谐振腔	72
5.3 CO_2 激光装置的结构	74
5.3.1 CO_2 激光装置的总体情况	74
5.3.2 用作工作物质的混合气体	76
5.3.3 CO_2 激光装置实例	77
5.4 YAG激光装置	79
5.4.1 YAG 激光装置的结构	79

5.4.2 连续激励激光器和脉冲激励激光器	82
第六章 表面处理	84
6.1 激光照射方式	84
6.2 金属表面对激光的吸收	86
6.3 涂覆处理	88
6.4 激光表面处理的优点	89
6.5 各种激光表面处理方法及其应用	90
6.5.1 表面硬化	90
6.5.2 表面均匀化	92
6.5.3 包覆和喷涂	93
6.5.4 表面合金化	101
6.5.5 表面重熔	102
第七章 切割	105
7.1 金属的切割	105
7.1.1 激光切割的特点	105
7.1.2 切割材料及其厚度	106
7.1.3 激光切割工艺	108
7.1.4 切割质量	109
7.1.5 各种金属材料的切割实例	114
7.1.6 激光切割系统	120
7.2 激光微调	127
7.2.1 微调的必要性	127
7.2.2 微调方法	127
7.2.3 微调装置	128
7.3 激光划片	130
7.3.1 划片的目的和用途	130
7.3.2 激光划片的优点	131
7.3.3 划片装置及划片与切割的比较	131
7.4 岩石和混凝土的切割	133
7.4.1 切割的目的	133

7.4.2	激光解体的利弊	134
7.4.3	岩石和混凝土的切割技术	135
7.4.4	钢筋混凝土的切割	139
第八章 焊接		141
8.1	熔深特性	141
8.1.1	保护气体与熔深	141
8.1.2	辅助气体的作用	146
8.1.3	焦点及其位置与熔深	147
8.1.4	熔化效率	150
8.2	厚板的焊接	152
8.2.1	激光焊的特点	152
8.2.2	各种金属的焊接	153
8.3	薄板的焊接	160
8.3.1	CO ₂ 激光焊	160
8.3.2	YAG 激光焊	166
8.4	激光焊接接头的冶金性能	172
8.5	增大熔深的各种方法	174
8.5.1	激光功率与熔深	174
8.5.2	激光束振动法	175
8.5.3	等离子气体的应用	176
8.5.4	TIG-激光组合焊接法	177
8.5.5	MIG-激光组合焊接法	179
第九章 打孔和钎焊		182
9.1	打孔	182
9.1.1	激光打孔的特点	182
9.1.2	应用实例	183
9.2	钎焊	188
9.2.1	激光钎焊的特点	188
9.2.2	钎焊方法	188
9.2.3	应用实例	191
参考文献		194

第一章 激光技术发展的历史和现状

1.1 激光的发现源于量子放大器

激光一词的英文是Laser, 是Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation的缩写, 意思是受激辐射产生的光放大。有人认为, 计算机、原子能和激光是大有发展前途的技术; 也有人认为, 第二次世界大战后在电工学和物理学领域中划时代的发明是微波、半导体和激光。总之, 激光是公认的当代重大科学技术之一。

第二次世界大战后雷达取得了显著的进展, 其中起主要作用的是微波理论和技术。当今, 引人注目的、充当大型计算机和个人计算机核心是集成电路和大规模集成电路的半导体。近些年来, 激光技术获得了重大的发展, 并盛行于生产、计测、通信及图像技术领域; 特别是美国总统里根的星球大战计划中鲜为人知的大功率武器, 这就是激光。对于划时代的发明, 尽管一些人提出这个, 另一些人提出那个, 但总有很多人, 包括预测将来有很大可能性的人指出其中之一必定是激光技术。

激光的发现源于量子放大器。美国汤斯 (C·H·Townes) 曾在战争期间从事雷达研究, 后来对亚毫米波 (波长 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{m}$) 和毫米波 (波长 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{m}$) 很感兴趣, 在1954年, 他使用分离高能态分子和低能态分子的方法, 使氮分子束喷到真空中, 再给它加高压, 发现高能级分子从高电场向低电

场迁移，而低能级分子与之相反地迁移，从而成功地取出了处于高能级的激励态分子。把这种分子束放入谐振腔就证实了自发发射的电磁波能引起受激发射。当时这种装置的功率很小，只不过 10^{-8}W ，波长只在微波范围。汤斯把它定名为Maser，即脉泽或量子放大器。它是Micro-wave Amplification by Stimulated Emission of Radiation的缩写，意思是受激辐射产生的微波放大。

这种量子放大器就是现在的激光器的发展基础。

1.2 研制的新型激光器

1958年，汤斯和肖洛 (A.L. Schawlow) 发表了《红外和光量子放大器》的论文，提出不仅微波能够放大，波长更短的普通光区域也能放大。于是用Light取代“Micro-wave Amplification”中的“Micro-wave”，取其缩写定名为Laser，即激光。因此激光也有人称之为光脉泽或光量子放大器。

由于量子放大理论和激光理论是论述离子、分子和原子的量子现象的电子学，更是由于Townes和苏联的巴索夫 (H. Г. Басов) 及普罗霍洛夫 (A. М. Прохоров) 在量子电子学领域中所具有的学识和功绩，所以他们都获得了1964年的诺贝尔奖。汤斯等人预言了激光的出现，而且确信能够研制出气体振荡的激光器。预言仅过了两年即在1960年，美国休斯 (Hughes) 实验室的梅曼 (T. H. Maiman) 使用与上述预言不同的材料，即用直径6mm、长45mm的红宝石固体工作物质，成功地产生了波长 $0.6943\mu\text{m}$ 的脉冲激光。这是世界第一台激光器，它迎来了激光研究的黎明。

表1.1 各种波光源一览表

激光器种类	振荡波长	发明年份/商品化年份	应用领域						
			工业		商业		医疗		军事
			材料加工	测量控制	印刷制版	通信	信息处理	娱乐	
气	CO ₂	10.6μm							
	小功率(<100W)		•						
	中功率(0.1~1kW)		•						
	大功率(>1kW)		•						
	化学HF, DF	2.6~4μm							
	激发复合物		•						
	ArF, KrF, XeCl, XeF	193, 248, 308, 351nm							
	远红外	20~1000μm							
	He-Ne	633nm		•					
	碘光解	1.315μm							
体	离子Ar, Kr, Xe	488, 514, 647, 530, 351nm	•	•	•	•	•	•	
	金属蒸气								
	He-Cd	442, 325nm							
	铜蒸气	510, 578nm	•						
	金蒸气	628nm							
		337nm							
	N ₂								
		1966/1969							

气

体

(续)

激光器种类	振荡波长	发明年份/ 商品化年份	应用领域									
			工业	商业			医疗		研究	军事		
			材料加工	测量控制	印刷制版	通信	信息处理	娱乐	诊断	治疗	光学	基础研究
液体	染料 连续振荡	400~1000nm										
	脉冲振荡	320~970nm										
固体	金绿宝石	700~815nm	•									
	色心	1.5~3.3 μ m										
	钕玻璃	1.06 μ m	•									
	YAG 连续振荡	1.06 μ m	•		•			•	•	•	•	•
体	脉冲振荡		•									
	红宝石	694nm	•	•								
	GaAs	0.90 μ m		•	•							•
固体(半导体)	GaAlAs	0.8~0.9 μ m		•	•							
	InGaAsP	1.3~1.6 μ m			•							
	铅盐	2~30 μ m		•								•
		1964/1975										

振荡一旦成功,障碍一经清除,新型激光器的研制就如雪崩之势,一一开展起来。首先是美国贝尔(Bell)实验室的贾万(A. Javan)于1960年末,使用汤斯当初预言的气体工作物质,即用He-Ne混合气体产生了波长 $1.153\mu\text{m}$ 的激光振荡。接着,美国麻省理工学院(MIT)的雷德卡(R. H. Rediker)、通用电器(GE)公司的霍尔(R. H. Hall)及国际商用机器(IBM)公司的内森(M. I. Nathan)等人研制成功半导体激光器。其后,竞相发明的激光器层出不穷。

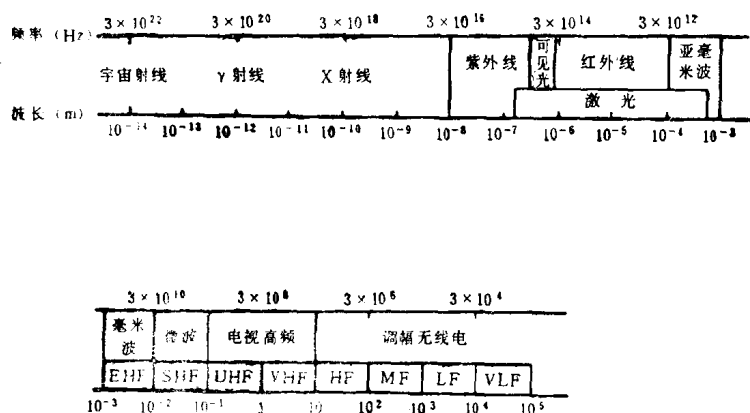


图1.1 激光在电磁波谱中的波长范围

表1.1是这些激光器的种类、振荡波长、发明时间和商品化时间以及应用领域一览表^[1-11]。图1.1是各种电磁波的波长和频率。 γ 射线和X射线的波长短,调幅无线电等的波长长。激光的波长处在紫外线至亚毫米波的范围。量子放大器工作在微波波段,波长比这个微波短的有毫米波、亚毫米波及红外线。激光是在亚毫米波以下的波长范围,所以它和量子放大器的关系在图中就一目了然了。图1.2更详细地说

明了激光的波长范围。通过对各种激光波长的表示就明确了它们各自所处的位置,而且还能由图可知各种激光器的振荡方式是连续波还是脉冲式。

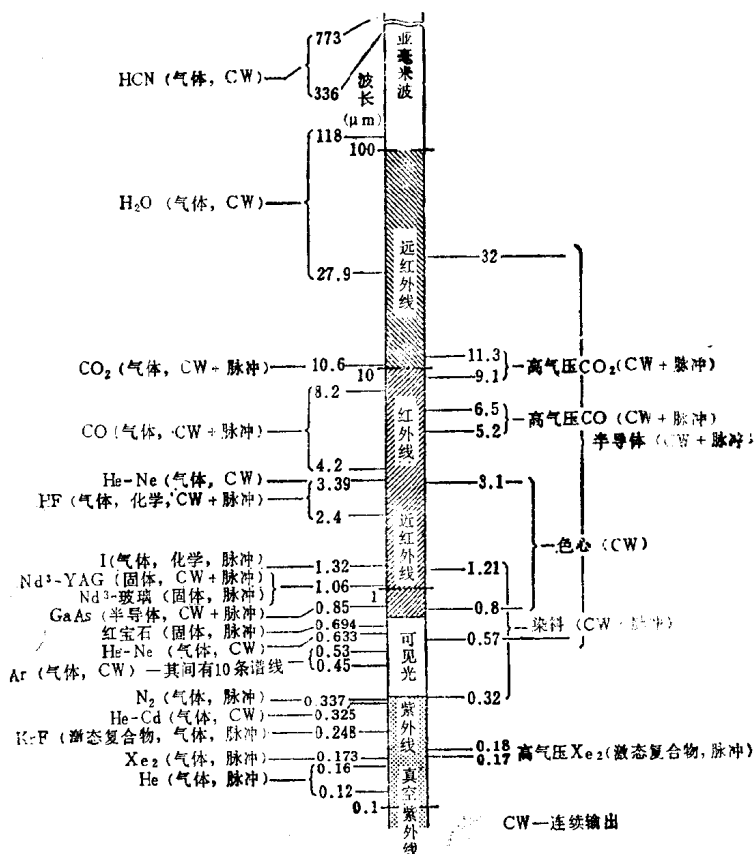


图1.2 激光的波长范围

1.3 激光器的大功率化和高效率化

自从1962年由美国光谱物理 (Spectra physics) 公司推

出第一台商品激光器——He-Ne激光器以来,已有20余年了。在这期间各种新型激光器相继问世,而且不断改进,其功率和效率都有显著的提高,应用范围也不断扩大。

与焊接和切割有关的YAG (Nd:YAG) 激光器,它刚进入市场时功率最大的只有10W (连续输出),而现在达到了600W,这并不亚于中等功率的CO₂激光器;不仅有了连续和脉冲YAG激光器,就连重复频率20kHz的脉冲YAG激光器也出现了。CO₂激光器当初由Bell实验室研制成功时,功率只有1mW,效率只有0.0001%。而当加入N₂和He时功率就提高了。光谱物理公司首先出售这种CO₂激光器,其功率达到100W。按CO₂激光器的结构来说,有纵向流动式、二轴正交式及三轴正交式。按其放电方式来说,有直流辉光放电式、交流无声放电式、直流辉光放电-高频放电式以及电子束预电离式。横向放电大气压(TEA) CO₂激光器和气动CO₂激光器也制造出来了。效率高 达百分之十几的CO₂激光器,其功率达到90kW。

不仅焊接和切割领域,而且其他领域也需要应用激光技术,因而半导体激光器获得了显著的发展。1962年研制出GaAs激光器,1970年出现了AlGaAs双异质结激光器,其功率为5~10mW。后来又研制出结构复杂的InGaAsP激光器以及结构的改进,现在这类激光器的功率达到200mW,正在实现大功率化,以满足时代的要求。

1.4 日本和美国激光器研制的差别

随着应用范围的扩大,激光器的销售额也一直在增长。图1.3和1.4是以美国为例,并按激光器的类型和用途统计的销售额^[1-2]。图1.3是几种典型激光器从1983年至1985年

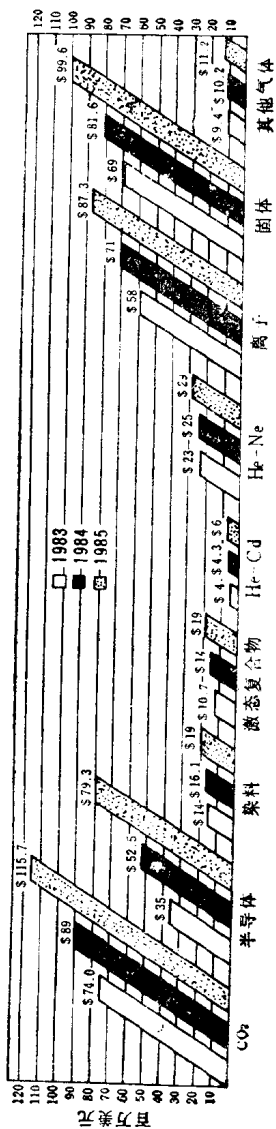


图1.3 美国几种典型激光器的销售额

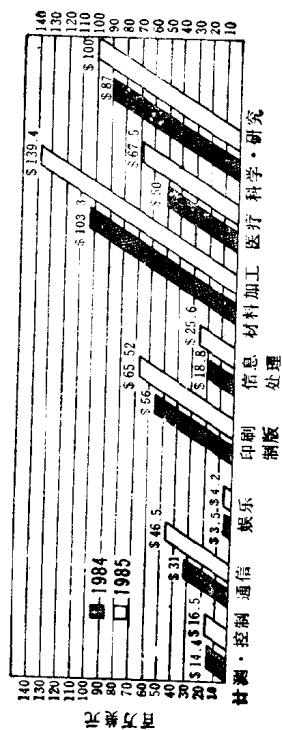


图1.4 按用途分的美国激光器销售额

的销售额,说明CO₂激光器的销售额最大,其后的顺序是YAG之类的固体激光器、离子激光器及半导体激光器。销售额的增长率以半导体激光器居首,其次是CO₂激光器和固体激光器。日本激光器的销售趋势和美国相同。图1.4是按用途统计的1984年和1985年的美国激光器销售额,说明在材料加工领域中(使用CO₂激光器和YAG激光器)的应用最广,其次是科学研究与发展领域。日本激光器的销售额和生产台数尚不十分清楚,有人估计到1985年为止的总生产台数:CO₂激光器为1000台,YAG激光器为2700台。据美国调查,日本在1983年的激光器销售额及与整个西方国家的比较如表1.2所示,可见日本激光技术的发达和激光器市场的繁荣。

表1.2 1983年日本和西方国家

各种激光器的销售额

(单位:百万美元)

激光器种类	日本	西方国家
He-Ne	17.0	23.0
离子	14.0	58.0
CO ₂	28.0	74.0
激发复合物	1.2	10.7
He-Cd	1.3	4.0
固体	22.0	69.0
半导体	86.0	35.0
总计	169.5	273.7

从日本和美国对激光器的研究、制造及应用来看,日本为使研制的激光器达到实用化,对结构和装置进行了改进,尽力用于生产,所以在焊接和切割中使用的CO₂激光器及YAG激光器,在计测中使用的He-Ne激光器以及在通信、计测和图像技术中使用的半导体激光器等类型的生产台数和美国差不多。

然而,日本对用于基础研究的新型激光器的研制与美国却有很大的差距。回顾过去,虽有林严雄博士研制成功双异质结半导体激光器的例子,但也是他在美国贝尔实验室工作时研制的。所以过去的新型激光器几乎全是美国研制的。

展望未来,日本的新型激光器还会落后于美国。美国国防部高级研究计划局(DARPA)的、属于星球大战(SDI)计划一项的所谓三位一体计划即由化学激光器、聚光反射镜及跟踪瞄准机构组成。1985年这项计划的预算总额为2亿美元,其中仅化学激光器的研制费就高达7500万美元。这只是一个例子,若加上SDI计划的其他激光器研制费,那更是一笔巨额预算。日本对激光器的研制,其军用的落后于美国。这一点即便在理,而研制其他新型激光器的投资也比美国少得多。并且,研究开发不是一投资就会有进展的,尚需配备优秀的人才。化学激光器以及碘激光器、X射线激光器、激态复合物激光器等可以用于超大规模集成电路的制造、放射线同位素的分离、废反应堆的解体拆除以及核聚变等领域,而日本对这些激光器的研制估计比美国落后10年或更多。

本书将对焊接、切割及热处理等材料加工中现已使用及将来可能使用的激光器,包括它们的原理、结构和应用等方面加以详细阐述。

1.5 激光加工的展望

在焊接、切割及热处理等材料加工中,现已使用或将要使用的激光器的生产和应用情况,这里再详细地说明一下。对日本及美国等西方国家激光加工机的产量和美国激光加工机的年产值进行了调查,结果之一如图1.5所示^[1-2]。由此可知,在材料加工领域中激光已不是理想之光,而是现实之光。

现在,从低碳钢、中碳钢、铸铁、特殊钢及不锈钢等金属材料的加工,到陶瓷、树脂及纤维等非金属材料的加工,都使用了工业激光器;从行业来说,涉及到汽车、电气、钢