

精密加工丛书

朱企业 等 编著

激光精密加工



机械工业出版社

精密加工丛书

激光精密加工

朱企业 等 编著



机械工业出版社

内 容 简 介

《激光精密加工》一书是《精密加工丛书》之一，内容共分八章，前两章主要讲述激光精密加工的基本原理和加工中常用的激光器，后六章分别讲述激光精密加工在打孔、切割、微调、焊接、热处理、存储等领域的应用。本书应用部分以工艺为主，所提供的工艺参数大都经过生产或试验考验，有一定参考价值。各章分别介绍了相应的有关设备，还介绍了国内外发展情况。

本书可供从事精密加工的工程技术人员使用，也可供大专院校的师生参考。

激 光 精 密 加 工

朱企业 等 编著

*

责任编辑：刘彩英 版式设计：霍永明

封面设计：姚 毅 责任校对：熊天荣

责任印制：王国光

*

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许可出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $8 \frac{1}{4}$ · 字数 183 千字

1990 年 7 月北京第一版 · 1990 年 7 月北京第一次印刷

印数 0,001—2,450 · 定价：6.40 元

*

ISBN 7-111-01038-8/TN·23

前 言

随着生产和科学技术的不断进步，精密加工技术有了更大的发展并得到广泛的应用。近几年来，精密机械和仪器仪表业对零件的加工精度和表面粗糙度提出了更高的要求，飞速发展的电子工业、航空工业、航天工业、生物工程、医疗器械制造等更离不开精密加工技术。为了适应形势的需要，总结、介绍国内外精密加工技术和先进经验，我们决定组织出版这套《精密加工丛书》。这套丛书的内容包括：精密磨削、精密研磨、精密电火花加工、激光精密加工、电子束和离子束加工、超声加工等。

本书主要讲述激光加工基础理论，常用激光器以及激光精密打孔、切割、微调、焊接、热处理、存储等的基本原理和应用。

本书由朱企业同志主编，丁俊华同志主审，共分八章。第一章激光精密加工总论（朱企业编写）、第二章激光加工常用激光器（朱企业编写）、第三章激光精密打孔（王健编写）、第四章激光精密切割（阎吉祥编写）、第五章激光微调（竺佩芳编写）、第六章激光精密焊接（蒲万林编写）、第七章激光热处理（刘永桢、周昌炽编写）、第八章激光存储（朱企业、罗烽编写）。

由于水平有限，书中难免有错误和不当之处，欢迎读者批评指正。

目 录

第一章 激光精密加工总论.....	1
第一节 激光的产生	1
第二节 谐振腔、激光的模式	5
第三节 高斯光束及其聚焦	12
第四节 激光的特性	18
第五节 激光加工材料的物理过程	22
第六节 激光在精密加工中的应用	29
第二章 激光加工常用激光器.....	37
第一节 固体激光器	38
第二节 调Q技术	42
第三节 气体激光器	51
第三章 精密激光打孔.....	59
第一节 激光打孔机理	60
第二节 精密激光打孔设备	62
第三节 精密激光打孔工艺	71
第四节 应用实例	100
第四章 激光精密切割	105
第一节 引言	105
第二节 激光切割原理	105
第三节 光束聚焦与工件位置	113
第四节 激光切割各种材料	117
第五节 与精密切割有关的其它应用	126
第五章 激光微调	129
第一节 引言	129

IV

第二节	激光和电阻膜的作用	130
第三节	最佳激光脉宽的选取	133
第四节	激光束最佳光强的选取	136
第五节	最佳重复频率的选取	137
第六节	最佳激光波长的选择	138
第七节	激光微调机	141
第八节	激光微调工艺	155
第六章	激光精密焊接	166
第一节	激光焊接特点	167
第二节	脉冲激光焊接	176
第三节	其他激光精密焊接方法	193
第四节	激光焊接设备	195
第七章	激光热处理	199
第一节	概述	199
第二节	激光和金属表面的作用	204
第三节	激光热处理参数选择基础	207
第四节	激光相变硬化层的耐磨性	211
第五节	激光表面合金化	215
第六节	激光处理及其对腐蚀性能的影响	218
第八章	激光存储	221
第一节	激光电视原理	221
第二节	光盘存储技术	234

第一章 激光精密加工总论

激光技术是 20 世纪 60 年代初发展起来的一门新兴科学，它在现代工农业生产、国防建设、医疗、通讯、科学研究等各个领域，愈来愈得到广泛的应用。在材料加工方面，已逐步形成一种崭新的加工方法——激光加工。把它用于精密加工，更有其独特的优越性。目前，激光加工已用于精密打孔、精密切割、划片、动平衡、电子器件的微调、精密焊接、热处理、以及激光录象和激光存贮等方面。本章就激光的基本特性、激光加工的基本原理和理论基础、激光精密加工总的应用等方面予以概述。

第一节 激光的产生

一、原子的发光过程

原子是由原子核和绕原子核转动的电子组成，原子的内能就是电子绕原子核转动的动能和电子被原子核吸引的位能之和。如果由于外界的作用，使电子与原子核的距离增大或缩小，则原子的内能也随之增大或减小，原子所允许具有的能量数值是一些不连续的量，只有电子在最靠近原子核的轨道上转动时才是稳定的，我们把这时原子所处的能级状态称为基态。当外界传给原子一定的能量时（例如用光照射原子），原子的内能增加，扩大外层电子的轨道半径，被激发到能量更高的能态，我们把这时原子所处的能态称为激发态或高能态。每个原子都有自身的基态和高能态。图 1-1 是

氢原子的能级，图中最低的能级 E_1 称为基态，其余 E_2 、 E_3 、……等都称为高能态。图中基态的能量值记为“0”，是指各能级的能量变化从基态算起，所以图中各能级的能量数值是指相对于基态的值。



图1-1 氢原子的能级

被激发到高能级以后的原子一般是很不稳定的，它总是力图回到能量较低的能级去，原子从高能级落到低能级（或由低能级到高能级）的过程称为“跃迁”。当原子从高能级（ E_n ）跃迁回到低能级或基态（ E_1 ）时，常常会以光子的形式辐射出光能量，其值为 $E_n - E_1$ 。所放出光的频率 ν 为：

$$\nu = \frac{E_n - E_1}{h} \quad (1-1)$$

式中 h ——普朗克常数， $h = 6.624 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

从上式可以看到，辐射出来的光子的频率 ν 完全决定于发生跃迁的两个能级的能量之差 $E_n - E_1$ 。

原子从高能态自发地跃迁到低能态而发光的过程称为自发辐射，自发辐射的光又称荧光（如图 1-2 所示），电灯、日光灯、高压水银灯等我们日常所见到的普通光源，都是由自发辐射跃迁所产生的。这种由自发辐射产生的光，由于各个原子自发跃迁返回基态时，时间上很不一致，光的传播方向向四面八方，而且由于激发能级很多，所以由各高能态分别向低能态跃迁产生的光的频率也不相同。自发辐射光单色

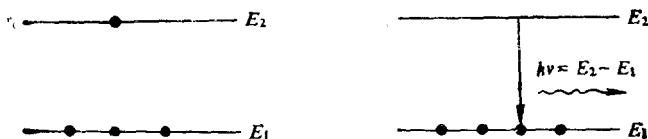


图1-2 原子的自发辐射

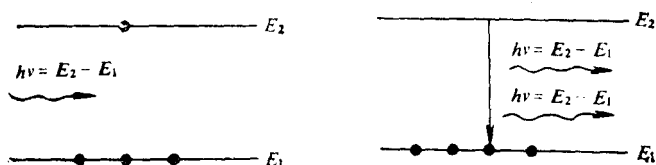


图1-3 原子的受激辐射

性很差，方向性差，是非相干光。

与自发辐射不同，如果处于高能态 (E_2) 的原子只有受到能量为 ϵ ($\epsilon = h\nu = E_2 - E_1$) 的外来光子所诱发时，原子就会从高能态 E_2 跃迁到基态(或低能态) E_1 ，并发射出一个与入射光子完全相同的光子，即它的频率、相位、传播方向、偏振方向都与入射光子相同。这个过程称为受激辐射。如图 1-3 所示，受激辐射是形成激光的重要基础。

二、激光的产生

物质在一定温度下处于热平衡时，原子或分子处于各个能级的粒子数按一定的统计规律分布。原子被激发到高能级后，会很快地自发地跃迁到低能级。在一般状态下，处于低能级的粒子数大于处于高能级的粒子数。

我们把原子停留在高能级的平均时间称为原子在该能级

的平均寿命。由于原子、离子等内部结构的特殊性，它在各个能级的平均寿命也不一样，在基态时，原子可以长时间地存在，而在激发状态，平均寿命一般都很短。但是，有些原子（或离子）的某个或某些高能级却有较长的平均寿命，这种平均寿命较长的高能级称为亚稳态能级。例如，红宝石中铬离子的高能级 E_3 的平均寿命只有 $0.001\mu\text{s}$ ，但高能级 E_2 的平均寿命却有几个毫秒，比 E_3 的平均寿命大几百万倍。同样，在氦原子、氟原子、氩离子、钕离子、二氧化碳分子等粒子中，也有这种亚稳态能级。

某些具有亚稳态能级结构的物质，在一定外界能源如光能、电能、化学能等激发下，可使原子或离子从低能级激发到高能级。在一定条件下（如照射光源足够强），就可能使处于高能态的原子数目大于处于低能态的原子数目，这种现象称为“粒子数反转”。物体处于粒子数反转的状态下，有大量的原子同时积聚在亚稳态能级上。此时，如果有一束外来光子照射诱发，而外来光子的能量恰好等于亚稳态和低能态（基态）的能量差，这时就能产生受激辐射，输出大量在频率、位相、传播方向、偏振方向都与外来光子完全一致的光，这就是激光。如果设法使受激辐射连锁反应持续下去，就能产生一束方向性很一致的激光。

例如人工晶体红宝石，是氧化铝中掺有 0.05% 的氧化铬，当脉冲氙灯照射红宝石时，处于基态 E_1 的铬离子大量激发到 E_3 状态，由于 E_3 寿命极短， E_3 状态的铬离子又很快地跳到寿命较长的亚稳态 E_2 。如果照射光足够强，就能够在千分之三秒时间内，把半数以上的铬离子激发到高能态 E_3 ，并很快转移到 E_2 ，实现 E_2 对 E_1 能级的粒子数反转，如图 1-4 所示。这时若有能量为 $\varepsilon = h\nu = E_2 - E_1$ 的光子诱

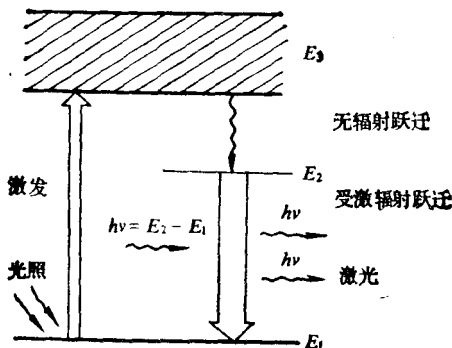


图1-4 粒子数反转的建立和激光形成

发，就会产生能级 E_2 。对能级 E_1 的受激辐射跃迁，在极短的时间内可以得到同一中心频率 $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ 的单色性好的光，这就是激光。由于激发能源是脉冲的，所以产生的激光也是脉冲的。

第二节 谐振腔、激光的模式

一、谐振腔 自激振荡器

由上节可知，处于粒子数反转状态的介质称激活介质（或增益介质）。当考虑激活介质受沿 Z 方向传播的外来光诱导时，则 will 引起沿 Z 方向的受激辐射，该方向受激辐射将愈来愈强，如图 1-5 所示。这种现象称为光放大或称光的受激增益，简称增益。

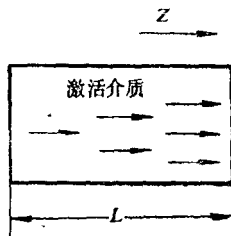


图1-5 受激放大

受激光放大（增益）是激活介质

中的主要过程之一。但在增益的同时，还存在与增益相反的过程即损耗，如由于光通过介质时的受激吸收损耗；由于激活介质的密度不均匀和含有杂质粒子所造成的折射损耗和散射损耗；镜面上的透射、衍射、吸收等损耗。谐振腔的损耗大小，常用品质因数 Q 值来衡量。 Q 值愈大表示损耗愈小； Q 值愈小表示损耗愈大。因此在激活介质中光沿 Z 轴传播过程中能获得放大的必要条件是增益必须大于损耗。增益等于损耗时的增益称阈值。换句话说光通过激活介质时能获得放大的必要条件是增益大于阈值。

这样的一段有限长度的激活介质就是一个良好的光放大器。在许多大功率装置中广泛地用它来把弱的激光束逐级放大。但是现代多数的激光器不是一个放大器，而是一个光自激振荡器。放大器与振荡器的区别是放大器只能放大外来输入的信号，不能自己产生信号，而振荡器，不需输入信号而能自激振荡输出信号。要实现振荡，必须将放大器输出信号的一个足够部分（大于往返损耗）再回到输入端来，这在电子学中称为反馈。同时要求反馈信号的位相与原输入信号位相相同，才能产生振荡。

激光器和这种情况类似，在有限长的激活介质（放大器）两端各加一块反射镜 M_1 、 M_2 ，通常其中一块反射镜的反射率 $R_1 \approx 1$ 称全反射镜，另一块反射镜的反射率 $R_2 < 1$ 称为部分反射镜，如图 1-6 所

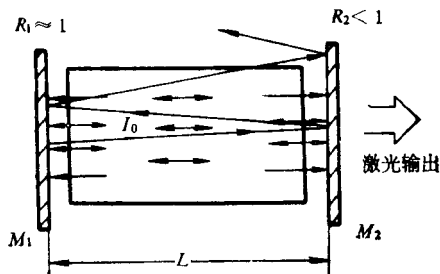


图 1-6 平行平面腔

示。这样一对互相平行，镜面垂直介质轴向的反射镜就构成了一个光学谐振腔称平行平面腔。

谐振腔的作用是多方面的，对输出激光的特性起着很重要的作用。特别是增益小的中小功率激光器几乎都用谐振腔。就现阶段而论，它一方面起到光反馈的作用。假设初始光强 I_0 由 M_1 镜面发出，通过激活介质 L 后光被放大，到达 M_2 。其中有一部分反馈回介质中使光继续放大，另一部分透射出去，作为输出激光，提供使用。如反馈回到 M_1 的光，抵消损耗后仍大于初始光强 I_0 。那末，不论沿介质轴方向传播的初始光强 I_0 （通常是激活介质的自发辐射）是多么微弱，但它在谐振腔中无数次往返传播，不断地得到放大。因此形成一个自激振荡器，输出一定频率的激光。谐振腔的另一方面的作用，是提高输出激光的方向性。因为只有那些沿轴方向往返的光才能得到多次放大，而对于那些偏离腔轴方向的光，经过若干次往返就将侧向逸出激活介质之外，得不到放大，所以谐振腔也起到控制光束传播方向的作用。

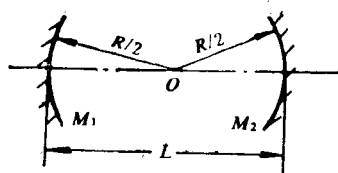
二、稳定球面腔

上面介绍的谐振腔是平行平面腔，这种腔要求两镜面严格平行并垂直腔轴，调节非常困难。实际中多数的谐振腔用球面镜代替平面镜，图 1-7 所示，其中 (a) 为双凹腔、(b) 为凹凸腔、(c) 为双凸腔。如果谐振腔的腔长用 L 表示，并规定凹面镜的曲率半径 R 为正值 ($R > 0$)；凸面镜的曲率半径 R 为负值 ($R < 0$)。

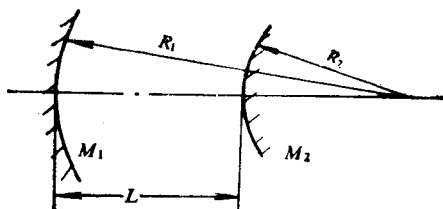
由理论可以证明，满足如下条件

$$0 \leq \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) \leq 1 \quad (1-2)$$

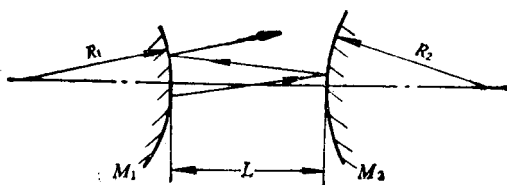
的谐振腔为稳定腔。



a)



b)



c)

图1-7 球面腔

如令 $g_1 = 1 - \frac{L}{R_1}$, $g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}$, 则稳定条件可写成

$0 \leq g_1 g_2 \leq 1$, 并由图 1-8 明显地表示出来。图中只有第一和第三象限中没有阴影线的区域代表稳定腔的 L 和 R 的取值范围。有阴影线的区域为非稳腔的 L 和 R 的取值范围。

如: (1) 0 点, $g_1 = g_2 = 0$ 由此得 $R_1 = R_2 = R = L$, 它代表一个对称共焦腔是稳定腔中最重要的一种腔, 如图

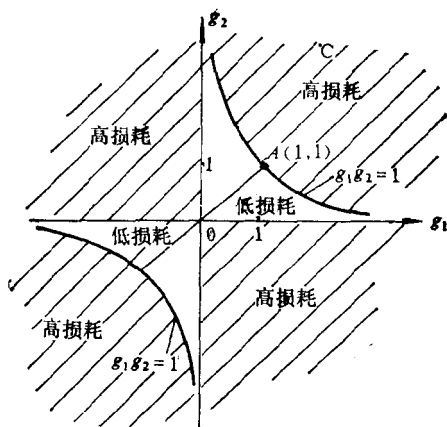


图1-8 稳定图

1-7 a 所示。

(2) A点, $g_1 = g_2 = 1$ 得 $R_1 = R_2 = \infty$ 即代表平行平面腔。

(3) C点, $g_1 > 1$, $g_2 > 1$ 代表一个双凸非稳腔 (因凸面镜 $R < 0$)。

(4) 当 $\frac{R_1}{2} + \frac{R_2}{2} = L$ 时, 代表一个凹面镜和一个凸

面镜构成的非稳虚共焦腔如图 1-7 b 所示。

稳定腔的特点是, 任意近轴光线在腔内往返无限多次不侧向逸出腔外, 几何损耗小。对于非稳腔傍轴光线在腔内往返若干次即侧向逸出腔外, 如图 1-7 c, 几何损耗大, 所以中小功率激光器不用非稳腔。但在一些增益较大的固体激光器中有时用非稳腔。这种腔的优点是输出耦合大, 容易通过调节腔的参数 L , R_1 , R_2 控制输出激光的功率。一个激光

器必须具有三个基本组成部分即激励能源、激光工作介质、谐振腔，详细内容在常用激光器一节中去讨论。

三、纵模、横模

1. 纵模

由前面的讨论，可知在谐振腔中的激活介质，当增益大于阈值（损耗）时，则沿腔轴方向传播的光将不断被放大，最后达到一个稳定的光强，其一部分将从激光输出镜射出。

前面也谈到激光振荡器要求从 M_1 镜发出的光经 M_2 镜反馈到 M_1 镜时，即经过 $2L$ 长路程后，反馈光波的位相应与初始光波的位相相同（即位相差 $\Delta\phi$ 为 2π 的整数倍），此关系可用下式表达

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2L = 2q\pi \quad (1-3)$$

式中 λ —— 激活介质中的波长；

q —— 正整数称为纵模序数。

上式可改写如下：

$$q \frac{\lambda}{2} = L \quad (1-4)$$

这个条件称为谐振条件。它表示谐振腔内只有那些半波长的整数倍等于腔长的光才能放大。不满足此条件的光由于损耗大于增益而自行消失。在此我们又看到谐振腔又起到一种选频的作用，它使得在荧光线宽范围内各种频率的光中，只有满足公式（1-4）条件的光得到放大。所以激光器输出的光单色性好。

公式（1-4），实际上也是沿 $+Z$ 方向传播的波与沿 $-Z$ 方向返回的波形成稳定驻波场的条件。此式表示每隔 $\lambda/2$ 即出现一个波节，一个波腹，如图 1-9 所示。波节处光强为零，

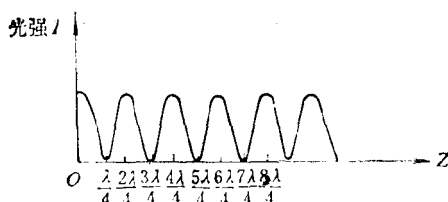


图1-9 沿腔轴驻波场光强分布

波腹处光强最大。沿腔轴方向形成的驻波场称为纵模。

一般纵模序数 q 值是很大的，它可由 $q = \frac{2L}{\lambda}$ 来估计。

通常谐振腔长在厘米量级，而光波长在微米量级，所以 q 在 10^4 量级。也就是说在厘米量级长的谐振腔中有上万波节与波腹。波节与波腹如此之密以致用肉眼是观察不出来的，但这种驻波场确实是存在的。

具有一个频率（或波长）的纵模激光器称单纵模激光器，有几个频率的纵模激光器称多纵模激光器。

2. 横模

上面我们讨论了沿腔轴方向形成的纵模场。下面我们再考察一下稍稍偏离腔轴的近轴光线的情况。对稳定腔而言，光束在两镜间作“Z字形”传播，也能往返无限多次而不侧向逸出腔外。这种光也足以克服损耗而逐渐放大，结果在垂直轴向的平面中观察到各种复杂的光强图案（如图1-10所示）。

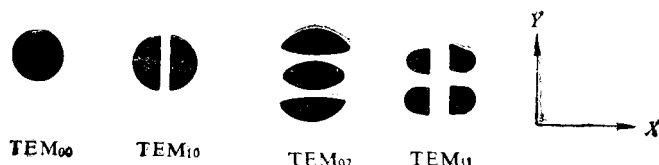


图1-10 横模光斑