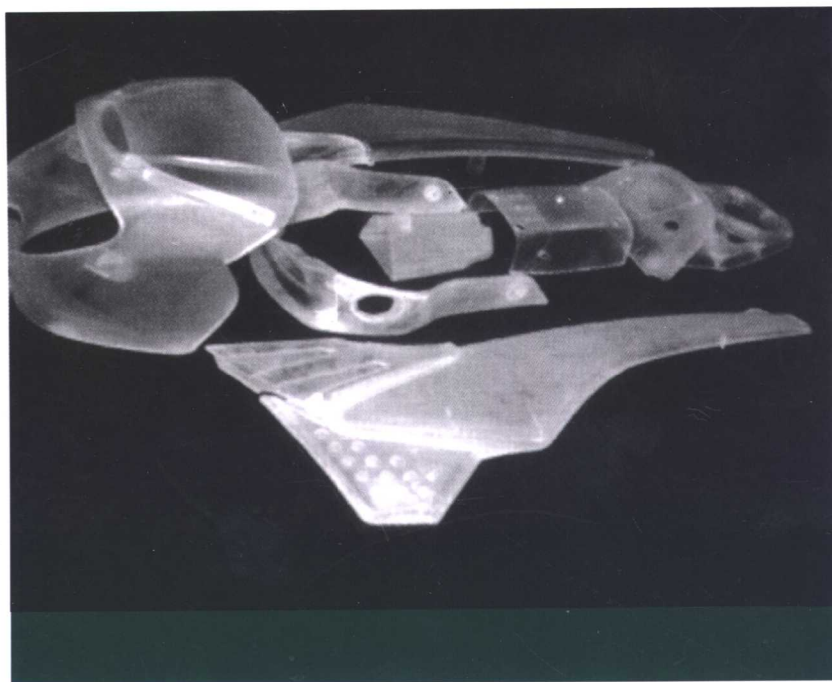


现代加工技术丛书

激光加工技术

张永康 主编 周建忠 叶云霞 副主编



Chemical Industry Press



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

现代加工技术丛书

激光加工技术

张永康 主编

周建忠 叶云霞 副主编



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

激光加工技术/张永康主编. —北京: 化学工业出版社, 2004. 7

(现代加工技术丛书)

ISBN 7-5025-5859-4

I. 激… II. ①张…②周…③叶… III. 激光加工
IV. TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 077305 号

现代加工技术丛书

激光加工技术

张永康 主编

周建忠 叶云霞 副主编

责任编辑: 张兴辉

责任校对: 吴桂萍

封面设计: 于兵

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话: (010) 64982530
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市昌平振南印刷厂印刷
三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 19 $\frac{1}{4}$ 字数 469 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5859-4/TH·213

定 价: 44.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

激光加工技术发展非常迅速，其应用范围日趋广阔，激光被誉为“万能加工工具”、“未来制造系统的共同加工手段”。先进工业国家的企业由于广泛应用激光加工技术，其生产技术正发生质的变化。目前，我国企业应用激光加工技术的速度正在不断加快，但与发达国家相比还有很大差距。因此，非常有必要编写一本论述激光加工技术的基本理论、工艺及最新的应用。

该书主编张永康博士是我国激光冲击加工技术研究领域的开创者之一，在激光加工基础理论和应用方面具有较高的造诣。他所领导的实验室的科技人员与博士、硕士研究生，近年来在激光加工技术领域，特别是在激光冲击强化、激光冲击成形研究方面已经取得了可喜可贺的成果。以他们自己的科研成果为基础，收集整理了激光加工技术的国内外主要研究成果，经过两年的努力编写成此书。该书内容翔实、文笔流畅，具有严谨的科学学风、较新的研究前沿动态和较完整的体系。该书反映了激光加工领域的最新进展，深入浅出，层次分明，具有较好的可读性和借鉴性，对于从事激光加工技术应用和研究的工作者会有比较好的参考价值。特此向广大读者推荐此书。

中国科学院院士

劉頌豪

2004年8月18日

前 言

现代加工技术通常是指特种加工技术，即将电、磁、声、光、化学等能量或其组合施加在工件的被加工部位上，从而实现材料被去除、变形、改性或表面处理等的非传统加工方法。

由于各种新材料、新结构、形状复杂的精密机械零件大量涌现，对机械制造业提出了一系列迫切需要解决的新问题。例如，各种难切削材料的加工；各种结构形状复杂、尺寸或微小或特大、精密零件的加工；薄壁、弹性元件等刚度、特殊零件的加工等。对此，采用传统加工方法十分困难，甚至无法加工，于是产生了特种加工技术。近年来，国家非常重视制造新技术的研发，加大了投入，特种加工技术获得了很大的发展，许多特种加工设备已经投入生产应用。当前，特种加工技术正在向工程化和产业化方向发展，大功率、高可靠性、多功能、智能化的加工设备的研发是重点。

从当前的制造业的发展趋势来看，现代加工技术将具有巨大的发展潜力和应用空间。在这样一个形势下，化学工业出版社组织出版了《现代加工技术丛书》。丛书共7种，包括《超声加工技术》、《激光加工技术》、《电火花加工技术》、《电化学加工技术》、《快速成形技术》、《微细加工技术》、《复合加工技术》。本书为《激光加工技术》。

激光技术发展非常迅速，激光的应用范围日趋广阔。激光在工业、商业、医疗、军事及研究等方面具有广泛的应用，诸如材料加工、材料表面处理、测量、印刷制版、通信、信息处理、娱乐、治疗、医生诊断、遥感、模拟、武器研制及光谱学等等。激光加工技术是利用激光束与物质相互作用的特性对材料（包括金属与非金属）进行切割、焊接、表面处理、打孔及微加工等的一种加工新技术，涉及到光、机、电、材料及检测等多门学科。在机械制造领域，不仅用于打孔、切割、焊和热处理等领域，而且用于各种精细加工（亚毫米至亚微米级的精微尺寸加工）。现在激光加工技术已从特殊用途的加工技术变为通用的、具有多种加工能力的精加工技术。目前，激光应用项目正在不断扩大，激光被誉为“万能加工工具”、“未来制造系统的共同加工手段”，不仅在国防工业，在民用工业也得到广泛应用。先进工业国的企业由于广泛应用激光加工技术，其生产技术正发生质的变化。现在衡量一个国家工业生产效率及其地位，很大程度上取决于其工业用激光器的制造及其引入生产中的速度。

本书主要介绍了激光加工技术的国内外主要研究成果，系统阐述了各种激光加工工艺、设备及应用、发展等，包括激光切割、激光焊接、激光淬火、激光微细加工、激光表面处理、激光材料成形等各个应用领域。技术内容新颖，通过大量的实验和工业应用数据图表，总结了国内外目前激光加工的最新研究成果、应用、技术进展等，并为未来激光加工技术的研究和发展指明了方向。例如介绍了激光冲击强化技术的国内外研究动态与发展、激光冲击过程理论分析、激光冲击的两种模型、涂层和约束层技术、激光冲击设备，以及典型材料激光冲击强化效果等。

本书由张永康、周建忠、叶云霞、任旭东、周建明、左教稳、殷苏民、杨兴华、高传玉、徐路宁等编著，张永康教授进行了全书的审核和定稿。

在本书的编写过程中，得到南京大学张淑仪院士，南京航空航天大学余承业教授，以及江苏大学的杨继昌教授、蔡兰教授等人的指导和帮助，在此表示衷心的感谢。还要感谢本书参考文献中所列的作者，他们的著作和论文为本书的编写提供了帮助。

由于编者水平有限，书中难免存在不当和错误，敬请广大读者批评指正。

主 编

2004年7月

目 录

第 1 章 激光加工导论	1
1.1 激光产生的物理基础	1
1.1.1 能级上的粒子数分布	1
1.1.2 自发辐射、受激吸收和受激辐射	1
1.2 激光产生的机理	3
1.3 激光器的基本构成	4
1.3.1 工作物质	4
1.3.2 泵浦源	6
1.3.3 光学谐振腔	6
1.4 激光的特点	8
1.4.1 单色性	8
1.4.2 方向性	8
1.4.3 相干性	9
1.4.4 高亮度	9
1.5 激光加工中普遍涉及的激光输出参数	9
1.5.1 激光模式	9
1.5.2 激光输出功率	10
1.5.3 激光偏振特性	10
1.6 激光加工的特点	10
参考文献	11
第 2 章 激光切割	12
2.1 激光切割技术概述	12
2.1.1 激光切割技术的国内外现状	12
2.1.2 激光切割的特点	14
2.2 激光切割机理	15
2.2.1 激光切割时切口的形成	15
2.2.2 激光切割主要方式	17
2.2.3 激光切割过程中能量的分析	18
2.2.4 激光切割过程温度场的数学模型	20
2.3 激光切割的工艺分析	23
2.3.1 打孔点位置的确定	23
2.3.2 辅助切割路径的设置	23

2.3.3	激光束半径补偿和空行程处理	24
2.3.4	优化排样及其算法	25
2.3.5	结合零件套排问题的路径选取	25
2.3.6	考虑热效应对路径的影响	25
2.4	激光切割的质量评价	26
2.4.1	激光切割零件的尺寸精度	26
2.4.2	激光切割的切口质量	26
2.5	影响激光切割质量的因素	27
2.5.1	激光功率对切割能力和质量的影响	28
2.5.2	激光束的质量	30
2.5.3	辅助气体和喷嘴的影响	33
2.5.4	切割速度的影响	37
2.5.5	焦点位置的影响	37
2.6	常用工程材料的激光切割	39
2.6.1	金属材料的激光切割	39
2.6.2	非金属材料的激光切割	43
2.6.3	复合材料的切割	44
2.7	激光切割安全	45
2.7.1	激光对人体的危害	45
2.7.2	激光切割的安全防护	45
2.8	激光切割技术的发展	46
	参考文献	47
第3章	激光焊接	49
3.1	激光焊接技术的兴起及发展	49
3.2	激光焊接的原理及过程	51
3.2.1	金属与激光的相互作用	51
3.2.2	激光焊接原理	53
3.2.3	激光焊接的特点	55
3.3	激光焊接的分类及其实现方式	56
3.3.1	脉冲激光焊	56
3.3.2	热传导焊接	57
3.3.3	激光深熔焊	59
3.4	激光焊接设备	62
3.4.1	激光焊接设备的组成	62
3.4.2	激光焊接设备现状	64
3.4.3	典型的激光加工设备	66
3.5	激光焊接工艺	68
3.5.1	脉冲激光焊工艺参数	68
3.5.2	连续激光焊工艺参数	69
3.5.3	激光焊接工艺参数的选择	76

3.6	激光焊接的影响因素及其焊接中常出现的问题	77
3.6.1	影响激光焊接的因素	77
3.6.2	激光焊接中常出现的问题	80
3.6.3	激光焊接过程中的热分析	83
3.6.4	激光焊接时常见的几种效应	87
3.7	典型材料的激光焊接	90
3.7.1	材料激光焊接的焊接性	90
3.7.2	金属材料的激光焊接	90
3.7.3	非金属材料的激光焊接	95
3.8	激光焊接在工业中的应用	95
3.8.1	激光焊接在汽车工业中的应用	96
3.8.2	激光焊接在钢铁行业中的应用	97
3.8.3	脉冲激光焊接的应用	98
3.9	激光焊接技术的发展及其前景	100
3.9.1	激光-电弧复合焊接及激光加丝焊	100
3.9.2	激光-高频焊管与激光焊管	101
3.9.3	激光焊接缺陷诊断	102
	参考文献	105
第4章	激光淬火	106
4.1	激光淬火的概述	106
4.1.1	激光淬火的原理	106
4.1.2	激光淬火的特点	106
4.1.3	激光淬火的应用和研究现状	106
4.2	激光淬火的理论基础	108
4.2.1	激光对金属材料的热作用	108
4.2.2	激光淬火的材料强化机理	110
4.2.3	激光淬火加热的数学模型及其求解方法	111
4.3	激光淬火工艺	113
4.3.1	工件的预处理	113
4.3.2	激光淬火工艺参数的选择	114
4.3.3	激光淬火后组织性能	116
4.4	激光淬火设备	116
4.4.1	光学系统	116
4.4.2	加工机床	117
4.4.3	辅助系统	118
4.5	典型零件的激光淬火	118
4.5.1	齿轮的激光淬火	118
4.5.2	发动机气缸体(套)内壁的激光淬火	120
4.6	激光淬火的应用和研究展望	121
	参考文献	122

第 5 章 激光抛光与激光修整金刚石砂轮	123
5.1 CVD 金刚石表面的激光抛光	123
5.1.1 概述	123
5.1.2 激光抛光金刚石膜	124
5.2 激光抛光光学玻璃	133
5.2.1 实验研究	133
5.2.2 激光驱动热处理的控制	134
5.2.3 激光抛光玻璃和玻璃-陶瓷表面的机理与方法	136
5.3 激光修整金刚石砂轮	137
5.3.1 概述	137
5.3.2 激光修整砂轮的理论	139
参考文献	145
第 6 章 激光微细加工	147
6.1 激光微细加工概述	147
6.1.1 微细加工技术	147
6.1.2 激光微细加工的方法及应用	149
6.1.3 激光微细加工的特点	151
6.2 激光微细加工原理及分类	152
6.2.1 热化学、光化学和反应速率	152
6.2.2 物质对光的吸收与热扩散过程	153
6.2.3 激光微细加工的机理	154
6.2.4 常用的激光微细加工技术	155
6.3 激光辅助淀积	158
6.3.1 激光辅助淀积的分类	159
6.3.2 气相激光辅助淀积	161
6.3.3 固相激光辅助淀积	162
6.3.4 液相激光辅助淀积	165
6.4 激光诱导扩散	166
6.4.1 扩散的理论分析	166
6.4.2 激光诱导扩散概述	167
6.4.3 激光诱导扩散的实验工艺	167
6.5 激光辅助掺杂	168
6.5.1 激光辅助掺杂概述	168
6.5.2 Si 衬底中磷的气相激光掺杂	170
6.5.3 固态激光扩散	172
6.6 准分子激光微细加工技术	174
6.6.1 准分子激光微细加工	174
6.6.2 准分子激光器的泵浦方式和特点	175
6.6.3 用于微细加工的准分子激光器	177
6.7 激光微细加工的应用	178

6.7.1	光学材料的激光微细加工	178
6.7.2	硅的激光微细加工	181
6.7.3	激光微细加工技术在 MEMS 中的应用	183
6.7.4	激光微细加工技术在 MOS 器件制作中的应用	186
6.7.5	激光微细加工技术在半导体材料加工中的应用	188
6.8	激光微细加工的现状及其发展前景	191
	参考文献	192
第 7 章	激光熔覆与激光合金化	193
7.1	激光熔覆	193
7.1.1	激光熔覆技术基础	193
7.1.2	激光熔覆材料	203
7.1.3	激光熔覆工艺方法	205
7.1.4	激光熔覆防开裂对策	208
7.1.5	激光熔覆技术的应用	211
7.1.6	激光熔覆的前景	214
7.2	激光合金化	215
7.2.1	激光合金化技术基础	215
7.2.2	激光合金化工艺	218
7.2.3	合金化层质量的控制	226
7.2.4	激光合金化技术防开裂对策	228
7.2.5	激光合金化技术的应用	230
	参考文献	232
第 8 章	激光板料成形	234
8.1	概述	234
8.2	激光热应力成形	234
8.2.1	激光热应力成形设备	236
8.2.2	激光热应力成形机理	237
8.2.3	主要影响因素	239
8.2.4	激光热应力成形的分析模型	243
8.2.5	存在的问题及发展	245
8.3	激光冲击成形	246
8.3.1	技术特点	247
8.3.2	工艺过程	247
8.3.3	主要影响因素	248
8.3.4	应用前景与展望	255
	参考文献	256
第 9 章	激光冲击强化	259
9.1	概述	259
9.2	激光冲击过程理论分析	259
9.2.1	激光的吸收及能量的传输	260

9.2.2	材料在激光冲击下的传热	262
9.2.3	金属在激光冲击下的汽化	263
9.2.4	激光冲击产生冲击波	265
9.3	激光冲击的两种模型	267
9.3.1	非约束模型下冲击波的压力	267
9.3.2	约束模型下冲击波的压力	268
9.4	涂层和约束层技术	270
9.4.1	能量吸收涂层	270
9.4.2	约束层	273
9.5	激光冲击设备	278
9.5.1	红宝石激光器	278
9.5.2	钕玻璃激光器	279
9.5.3	掺钕钷铝石榴石 (ND ³⁺ : YAG) 激光器	279
9.6	典型材料激光冲击强化效果	280
9.6.1	QT700-2 球墨铸铁	281
9.6.2	45 钢材料	282
9.6.3	2024 铝合金	284
9.7	激光冲击强化技术的应用与发展	288
	参考文献	290

第 1 章 激光加工导论

1.1 激光产生的物理基础

1.1.1 能级上的粒子数分布

根据原子物理理论和量子理论可知，组成物质的粒子处于一系列的分立能级中，能量最低的状态为基态，其他比基态能量高的状态叫做激发态。在热平衡情况下，任意两个高低能级上粒子数分布服从玻尔兹曼统计规律

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-\frac{(E_2 - E_1)}{KT}} \quad (1-1)$$

式中， n_1 和 n_2 为能级 E_1 、 E_2 的粒子数，为简化起见，已令能级 E_1 、 E_2 的能级简并度相等。由于 $E_1 < E_2$ ，所以 $n_1 > n_2$ ，即在热平衡时，在任意两个高低能级上，高能级粒子数恒小于低能级粒子数，如图 1-1 (a) 所示。但是如果在外界能量（热能、光能、化学能等）的激励下，可以使得低能级上粒子吸收能量后跃迁到高能级，从而使得 $n_2 > n_1$ ，则该物质实现了高能级与低能级之间的粒子数反转或集居数反转，如图 1-1 (b) 所示。处于粒子数反转状态的物质称为激活物质或工作物质。

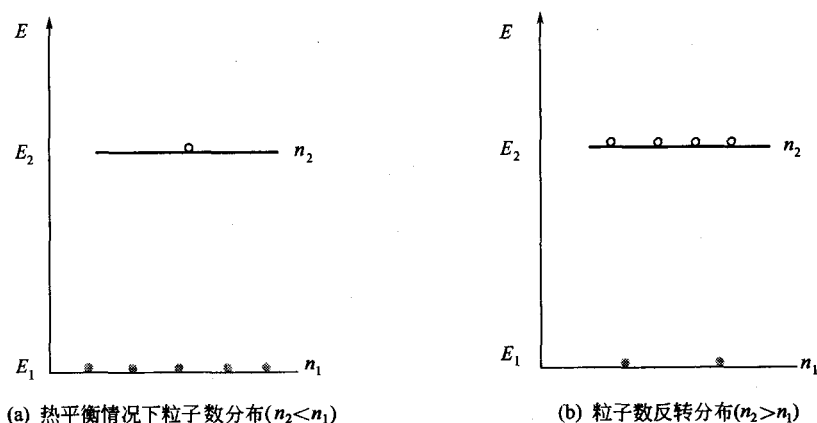


图 1-1 粒子数分布示意 ($f_1 = f_2$)

1.1.2 自发辐射、受激吸收和受激辐射

激光是通过光与物质相互作用，尤其是作用过程中的受激辐射而产生的。受激辐射的概念是爱因斯坦于 1917 年首先提出的^[1]。爱因斯坦从量子论的观点出发提出，在辐射与物质

相互作用的过程中包含以下三个过程：粒子的自发辐射跃迁、受激辐射跃迁和受激吸收跃迁。

自发辐射跃迁是在没有任何外界激励的作用下，处于高能级 E_2 的粒子将自发地跃迁到低能级 E_1 ，同时辐射频率为 ν 的光子，并满足 $E_2 - E_1 = h\nu$ ，如图 1-2 所示；当粒子系统受到外来的能量为 $h\nu$ 的光子作用（激励）下，并且满足 $E_2 - E_1 = h\nu$ ，则处于低能级 E_1 上的粒子由于吸收一个能量为 $h\nu$ 的光子而受到激发，跃迁到高能级 E_2 上去，该过程即为物质的受激吸收（图 1-3）。受激吸收过程将会消耗入射光的能量；受激辐射与受激吸收的过程正好相反，当粒子受到外来的能量为 $E_2 - E_1 = h\nu$ 的光子作用（激励）时，处在高能级 E_2 上的粒子在能量为 $h\nu$ 的光子诱发下，而从高能级 E_2 跃迁到低能级 E_1 ，并且发射一个与外来光子一模一样的光子，这种过程叫受激辐射（图 1-4）。由此可以看出受激辐射对入射光具有放大作用。

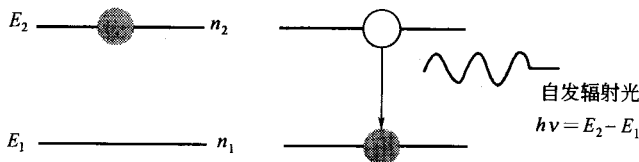


图 1-2 自发辐射

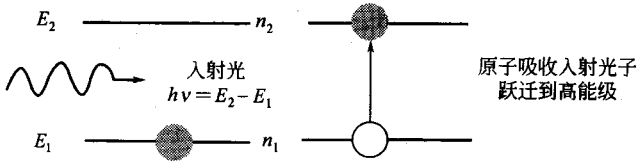


图 1-3 受激吸收

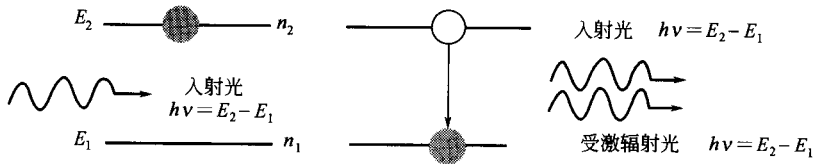


图 1-4 受激辐射

受激跃迁与自发跃迁是两种本质不同的物理过程。自发辐射跃迁概率 A_{21} 只与物质本身的性质有关；而受激辐射跃迁概率 W_{21} 和受激吸收跃迁概率 W_{12} 不仅与物质的性质有关，还与辐射物质的辐射场有关，在高低能级的能级简并度相等时， $W_{21} = W_{12}$ 。另外，自发辐射产生的光是非相干光，其波长、相位、传播方向和偏振方向等都是随机无规律的；而通过受激辐射可以诱发与入射光子一模一样的光子，可以实现同态光子数放大，从而可得到光子简并度极高的相干光。激光器产生激光，正是利用受激辐射的上述特点，所以激光具有方向性好、单色好、相干性好和高亮度的特点。

1.2 激光产生的机理

辐射场作用于物质时，受激吸收、受激辐射和自发辐射并存。在热平衡情况下，受激吸收光子数 $n_1 W_{12}$ 恒大于受激辐射的光子数 $n_2 W_{21}$ ，因此物质总体表现为消耗入射光，此时见不到光放大现象。欲产生激光，必须使得 $n_2 > n_1$ ，即被辐射物质实现粒子数反转，此时 $n_1 W_{12} < n_2 W_{21}$ ，受激辐射占优势，可以实现对入射光的光放大。

因此，产生激光的首要条件是：必须要有实现粒子数反转的激活物质。一段激活物质为一个光放大器，有一束能量为 $E_2 - E_1 = h\nu$ 的入射光子进入该激活物质，这时受激辐射产生的光子数将超过受激吸收消耗的光子数，而使受激辐射占主导地位。在这种情况下，光在激活物质内将越走越强，使该激光工作物质输出光的能量超过入射光的能量，这就是光的放大过程。光放大作用的大小通常用放大（或增益）系数 G 来描述，其物理意义为光通过单位长度激活物质后光强增长的百分数。光在增益介质内传播放大的同时，增益介质和光腔内也存在着各种各样光的损耗，引入损耗系数 α ，其物理意义为光通过单位长度激活物质后光强衰减的百分数。

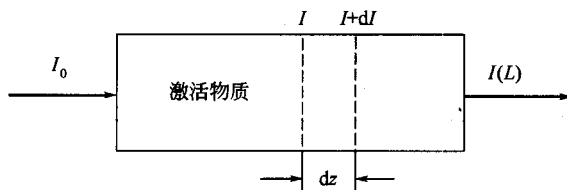


图 1-5 光在激活物质中的放大

如图 1-5 所示，设在传播方向 z 处的光强 $I(z)$ （光强 I 正比于光的单色能量密度 ρ ），则增益系数为

$$G(z) = \frac{dI(z)}{dz} \times \frac{1}{I(z)} \quad (1-2)$$

衰减系数为

$$\alpha = -\frac{dI(z)}{dz} \times \frac{1}{I(z)} \quad (1-3)$$

当同时考虑介质的增益和损耗，光强总增加值为

$$dI(z) = [G(z) - \alpha] I(z) dz \quad (1-4)$$

光强很弱时增益系数为一近似不变的常数，称之为小信号增益系数，用 G^0 表示。因此当有一微弱光 I_0 进入一放大器。起初，光强 $I(z)$ 将按小信号放大规律增长，根据式 (1-2) 有

$$I(z) = I_0 e^{(G^0 - \alpha)z} \quad (1-5)$$

但实际情况是，光强的增加是以消耗反转粒子数 $n_2(z) - n_1(z)$ 为代价，而反转粒子数降低

又将降低增益系数 $G(z)$ ，进而使得 $I(z)$ 的增长逐渐变缓，这一现象叫做增益饱和效应。由于饱和效应，使得增益系数按式 (1-6) 减小^[2]，即

$$G(I) = \frac{G^0}{1 + \frac{I}{I_s}} \quad (1-6)$$

最后，当增益和损耗达到平衡时， $I(z)$ 不再增加并达到一个稳定的极限值 I_m ，其值为

$$I_m = \frac{G^0 - \alpha}{\alpha} I_s \quad (1-7)$$

I_m 只与放大器本身参数有关，与初始光强 I_0 的大小无关，只要激活物质足够长，无论初始光强多大，最终总能形成确定大小的光强 I_m 。

上述由于介质增益、损耗以及粒子数反转变之间相互消长、相互平衡，最终可以得到一个确定大小的光强 I_m 的过程称为自激振荡，该过程如图 1-6 所示。

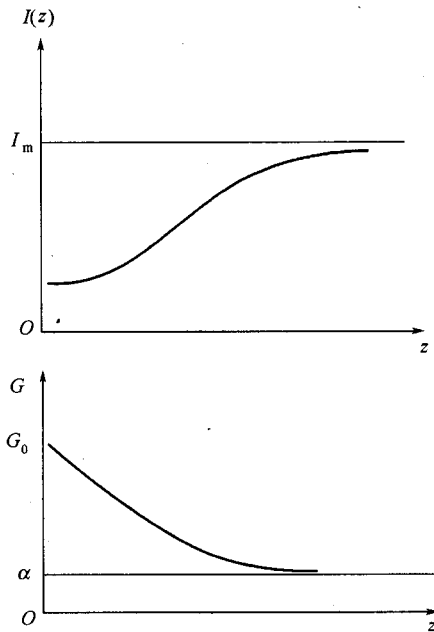


图 1-6 增益饱和与自激振荡

1.3 激光器的基本构成

实际上激活物质不可能做得太长，一般采用在激活物质两端放置镀有高反射率的两块反射镜，形成光学谐振腔，这样，初始光强 I_0 就会在反射镜间往返传播，等效于增加激活介质的长度，最终可得到一个确定大小的光强 I_m 。另外为了使普通物质转变成激活物质，还需要外界激励能源（或称泵浦源）。这样一个常规的激光器就应该包括三部分：工作物质、泵浦源和光学谐振腔。

1.3.1 工作物质

工作物质是产生激光的物质基础，是激光器的核心部分，是用来实现粒子数反转并产生

受激辐射的物质体系。工作物质的分类方式通常有两种：一种是根据工作物质的存在形态分类，工作物质可以是气体、固体、液体及半导体等；另一种是根据速率方程理论分析产生激光的过程时所适用的能级结构，可以分为三能级系统、四能级系统等。

在气体激光器中产生激光的粒子为气体分子或原子，如 He-Ne 激光器中 He、Ne 混合气体为工作物质，Ne 原子为工作粒子，即粒子数反转发生在 Ne 原子的某一对或几对能级间，He 气为辅助气体，用以提高 Ne 原子的泵浦速率。CO₂ 激光器是以 CO₂、N₂ 和 He 等组成的混合气体为工作物质，激光跃迁发生在 CO₂ 分子的两个能级间，其他成分起促进 CO₂ 分子的两能级间形成粒子数反转或降低工作物质温度等作用。在固体激光器中，掺有少量过渡金属离子或稀土离子的晶体或玻璃为工作物质，掺杂离子为工作粒子，经外界能量泵浦产生粒子数反转后可产生受激辐射，晶体和玻璃为基质材料。液体激光器其工作物质的存在形态为液体，常见的有染料激光器，其工作物质为染料溶解于溶剂中组成的溶液，染料分子为工作粒子，溶剂相当于基质。半导体激光器的工作物质为半导体，虽然半导体为固体，但是由于半导体激光器粒子数反转的形成机理与普通固体激光器有本质的不同，所以一般不将二者归为一类。正常情况下，在半导体中电子总是先填充低能态的价带，填满价带后再填充导带，如果利用光或电注入的方式，使 P-N 结附近形成大量的非平衡载流子，在比其复合寿命更短的时间内，电子在导带、空穴在价带分别达到暂时平衡，则在这一段时间内简并化分布的导带电子和价带空穴就处于相对反转分布的状态，从而形成半导体中的粒子数反转；除此以外，自由电子激光器中，相对论电子束为工作物质。在化学激光器中，工作物质可以是参加化学反应的成分，也可以为化学反应后生成的成分。

四能级系统激光工作物质中参与作用的能级被简化为四个：基态 E_0 、抽运高能级 E_3 、激光跃迁的上能级 E_2 和下能级 E_1 ，见图 1-7。由于 E_1 能级不是基态能级，因而在热平衡时， E_1 上粒子数比较少，因此只要上能级 E_2 存在粒子，就容易实现粒子数反转，产生激光所要求的外界激励阈值水平较低。CO₂、Nd³⁺:YAG、He-Ne 等都是典型四能级工作物质，另外在用速率方程理论分析染料激光器时，也可以将其视为四能级系统。

三能级系统激光工作物质能级结构简图如图 1-8 所示，其参与相互作用过程的能级有三个，即基态 E_1 、抽运高能级 E_3 和亚稳态能级 E_2 ，其特点是激光跃迁下能级为基态，因此为了实现粒子数反转必须将一半以上的工作粒子激励到激光跃迁能级上，因而相对于四能级系统而言，外界激励阈值水平要求很高。红宝石激光物质就是典型的三能级系统。

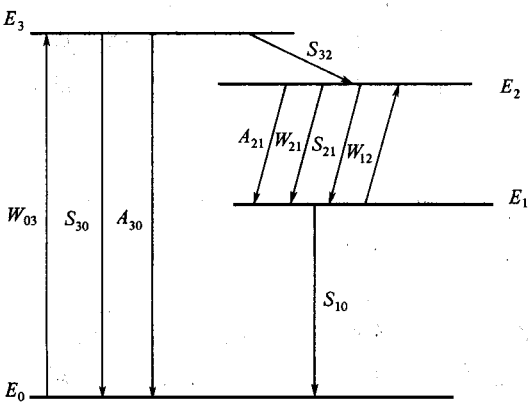


图 1-7 四能级系统能级结构示意图

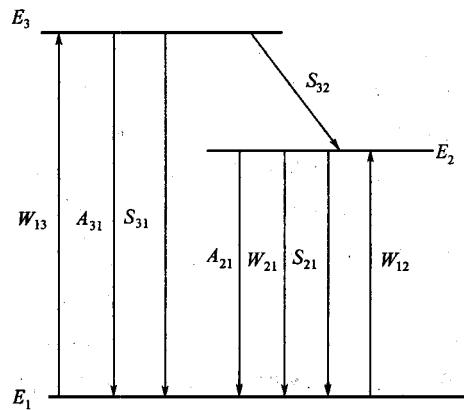


图 1-8 三能级系统激光工作物质能级结构示意图