

XIANDAI
JIGUANG
ZHIZAO JISHU

现代激光制造技术

张国顺 主编



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

现代激光制造技术

张国顺 主编



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

现代激光制造技术/张国顺主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 10

ISBN 7-5025-7734-3

I. 现… II. 张… III. 激光加工 IV. TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 119394 号

现代激光制造技术

张国顺 主编

责任编辑: 陈 丽

文字编辑: 张燕文

责任校对: 李 林

封面设计: 尹琳琳

*

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)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 21½ 字数 526 千字

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7734-3

定 价: 39.80 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

激光问世已经四十余年了，它一经问世就发展得十分迅速，激光器件已经形成百亿美元的全球产业，激光应用已经遍及工、农、商、学、兵各个行业，在各个领域产生了巨大影响。激光在制造业中也同样发展得非常迅速，有人预计，它将成为 21 世纪世界工业发展的重要产业。激光制造技术效率高、质量优、清洁、加工范围广、经济效益好、易于进行自动化控制，能实现柔性加工和智能加工，能解决传统加工中许多无法解决的难题。目前发达国家和发展中国家都把激光制造技术作为提高生产率和参与国际竞争的重要手段。

经过几个五年计划重点攻关，我国已在激光加工技术、激光器件等领域取得了许多成果，具有相当的应用规模和较高的技术水平，也有不少专著问世。目前，激光制造技术已从原来的激光材料加工（激光热加工，包括打孔、切割、焊接和表面热处理等）扩展到激光快速成型、激光内雕、飞秒激光加工、激光清洗等多方面的应用，本书及时地将许多方面的进展加以收集，对进一步推动激光制造学科的发展很有益处。

本书内容的主要特点和它的现代性表现如下：一是及时写进了作者多年的教学、科研经验，且多数是作者对于工程应用的实践总结；二是及时将国内外激光公司的产品和技术数据写出来，为读者便捷和深入了解动向提供了方便；三是及时将国内外激光制造技术的最新动向告诉读者，并为读者提供许多有用的资料，而且经过作者消化、吸收并系统写出来，条理性强，实属可贵。

本书是一本专著，对于从事激光工程特别是激光制造工程的读者以及相关专业大专院校师生会有很多很好的参考价值。本书内容丰富、结构严谨、文笔简洁，我愿热忱向读者推荐，希望对推动我国激光制造现代化、产业化起带动作用。

中国光学学会激光加工专业委员会主任



2005 年 7 月

前 言

激光制造技术是涉及了光子学、机械学、电子学、计算机等多学科综合交叉的高新技术。随着全球科技的迅速发展和国民经济不断增长的要求,激光加工技术在近十余年来有了长足的进步,并且在实际意义上已经发展到激光制造的程度,先进的制造技术能够带动整个国民经济的发展,起到改变整个国民经济格局,促进现代化发展的作用。

相对论和量子力学为激光的产生奠定了理论基础,1960年第一台激光器的出现标志着量子光学由理论发展到技术工程,激光的诞生开始了一场光子学的革命,产生了光电子学。激光在改变着世界,21世纪是光子的时代,激光制造因用途广泛,也将获得突飞猛进的发展。

激光制造作为一种先进的加工技术,一直受到世界各国的重视,我国在863计划和多次的五年计划中都将激光加工作为先进制造技术列入规划。伴随着大功率激光器的发展和数控技术的提高,激光加工制造技术在国内外均有很大进展,并已形成激光产业,且涌现出一大批技术水平高、产销量大的激光加工设备制造公司。

激光制造技术的主要内容是激光切割、激光焊接、激光打标、激光微细加工、激光热处理、激光毛化、激光熔覆、激光表面合金化、激光快速成型、激光雕刻、激光打孔,以及近年开始研究的飞秒激光加工和激光清洗技术等。本书力求以务实的精神、尽量反映国内外现阶段技术成果和先进水平,对各项应用技术的原理、构成、关键技术以及相应的理论,代表性典型样机,主要技术参数有详尽的描述。本书选材更多的偏重于实际应用技术,力求使读者能够获益,从中受到启迪,并引起读者的兴趣。书中论述重点着眼实际知识,面向激光技术人员、相关专业大专院校师生以及对激光应用感兴趣的读者,如果能够使您从书中得到具体的帮助,便是我们作者最大的宽慰。

书中首篇以简练的语言叙述了激光的基本原理、激光的主要特性、激光加工常用的各种激光器,还分析了激光与物质相互作用的机理,介绍了激光加工常用的光学系统,激光加工用数控机床以及激光系统运行过程中的安全防护问题。随后各章顺序介绍了激光焊接技术、激光打标技术、激光切割技术、激光雕刻技术、激光热处理技术、激光打孔技术、激光快速成型技术、激光精密加工技术以及激光清洗技术、飞秒加工技术等。

“发展高科技,实现产业化”是我们的发展方向,光机电一体化产业的水平决定了国民经济发展的水平。激光制造有着广阔的市场前景。21世纪激光制造大有可为,随着人们研究实践活动水平的提高,随着激光工作者聪明才智的发挥,还会出现许多新的激光应用技术,并迅速形成产业,对光和光子的认识和利用每前进一步,人类社会就会前进一大步。

激光器的发明是20世纪的重大成就,半个世纪以来获得了全面的发展,激光制

造技术产业已成为世界科学密集型工业中的主要产业。

本书共分十章，由天津大学精密仪器与光电子工程学院激光专业的老师分工合作。第1章激光技术基础由于建执笔；第2章激光打标技术、第3章激光焊接技术由张国顺执笔；第4章激光切割技术、第8章飞秒激光加工技术和第10章最新激光加工技术由张帆执笔；第5章激光热处理技术由许宝忠执笔；第6章激光雕刻技术、第7章激光打孔技术和第9章激光快速成型技术由撒昱执笔，王萌参加了本书一些章节的书稿整理和全书的计算机编排工作。全书由张国顺主编。

本书内容选择方面，特别强调了作者多年来教学、科研的经验和成果，尤其是写进了作者在激光制造加工方面的点滴经验。

特别感谢国内外同行为我们提供了激光设备方面的许多新资料，书中引用了多家激光公司产品和技术数据，并在文中予以重点注明，使得本书在技术内容上能够跟踪国内外最先进水平，在此向为我们提供资料的国内外各大公司、科研院所、高等院校和给予帮助的朋友们表示衷心的感谢，还要感谢中国光学学会、激光加工专业委员会主任邓树森教授，在百忙之中为本书进行审校，并执笔作序，无疑会增进读者对激光制造技术的了解。

作者除了以传统方式通过国内外书刊杂志搜集资料外，还充分利用了互联网这一先进工具，获得了许多有关激光制造方面的有用资料，不过限于时间和篇幅，难免挂一漏万，读者欲了解更多内容，可通过各篇末列出的参考文献和有关网站查询。

光学有光辉灿烂的历史，但光学尚未被充分认识，尚未得到普及和了解。本书作者虽已从事激光教学与研究三十余年，书中也融进了作者多年研究的一些体会，然而作者自知对激光的了解还很肤浅，对激光制造研究的深度和广度还远远不够，有些很好的激光制造成果可能未收录进来，书中的内容难免有所欠缺，恳请各位专家、读者不吝赐教。

張國順

2005年6月于天津大学

目 录

第 1 章 激光加工物理基础	1
1.1 激光物理基础	1
1.1.1 激光产生的机理	1
1.1.2 激光光束的特性	9
1.1.3 激光器的输出特性及其对激光加工的影响	11
1.1.4 激光加工中常用的激光技术	16
1.1.5 激光加工的特点	22
1.2 激光与物质的相互作用	23
1.2.1 激光与物质相互作用的物理基础	23
1.2.2 金属材料对激光的吸收	27
1.2.3 非金属材料对激光的吸收	29
1.2.4 光致等离子体	32
1.2.5 激光防护	33
1.3 激光加工用激光器	43
1.3.1 Nd:YAG 激光器	43
1.3.2 CO ₂ 激光器	48
1.3.3 准分子激光器	52
1.3.4 半导体激光器	54
1.3.5 光纤激光器	58
1.3.6 其他激光器	62
1.4 激光加工用光学系统	64
1.4.1 激光光学元件	64
1.4.2 光学聚焦系统	66
1.4.3 光学匀光系统	68
1.4.4 光学导光系统	70
1.5 激光加工用数控系统	72
1.5.1 龙门式激光加工系统	72
1.5.2 飞行光学加工系统	73
1.5.3 精密坐标加工系统	74
1.5.4 激光加工用机器人	75
参考文献	76
第 2 章 激光打标技术	77
2.1 振镜式激光打标技术	78
2.1.1 振镜式激光打标技术原理	82

2.1.2	振镜式激光打标的误差及修正	83
2.1.3	振镜式激光打标开关激光信号的调整	84
2.1.4	振镜式打标机构的三维加工	86
2.1.5	振镜式激光打标技术的典型应用	88
2.1.6	激光飞行打标技术	91
2.2	掩模式激光打标技术	100
2.2.1	掩模式激光打标的原理与光学系统	100
2.2.2	掩模板的制备	101
2.2.3	掩模式激光打标应用举例	101
2.3	点阵式激光打标技术	102
2.3.1	数字点阵式激光打标机	102
2.3.2	激光头移动式点阵激光打标机	102
2.3.3	利用激光焊接机、切割机打标	103
2.4	激光打标技术的发展	104
	参考文献	105
第3章	激光焊接技术	107
3.1	概述	107
3.2	激光焊接原理	107
3.2.1	激光热传导焊接	108
3.2.2	激光深熔焊接	108
3.3	激光焊接工艺参数的作用与实验选择	110
3.3.1	激光焊接工艺的主要参数	110
3.3.2	激光焊接主要参数的选择	110
3.4	激光焊接实用举例	116
3.4.1	新型电池的激光焊接	116
3.4.2	精密仪表零件的激光焊接	123
3.4.3	激光焊接在汽车制造业中的应用	127
3.4.4	激光自动焊接	132
3.5	激光焊接技术的发展前景	134
	参考文献	135
第4章	激光切割技术	137
4.1	概述	137
4.2	连续激光切割的基础	137
4.2.1	连续激光切割材料的特点	137
4.2.2	连续激光切割材料的机理及分类	138
4.2.3	影响连续激光切割质量的因素	139
4.3	常用材料的激光切割特性	144
4.3.1	金属板材的激光切割	144
4.3.2	非金属材料激光切割	146
4.4	连续CO ₂ 激光的特色应用	147
4.4.1	钣金件激光切割	147

4.4.2	非金属板材的激光切割	150
4.4.3	特殊高质量部件的激光切割	151
4.4.4	三维激光切割	156
4.5	脉冲固体激光切割应用	156
4.5.1	微喷水波导激光切割应用	156
4.5.2	紫外脉冲激光切割高精度模板	158
4.5.3	脉冲激光的其他微加工应用	160
4.6	连续固体激光应用于材料切割	160
4.6.1	大功率片状激光器	161
4.6.2	大功率光纤激光器	161
	参考文献	162
第5章	激光热处理技术	164
5.1	激光淬火技术	164
5.1.1	概述	164
5.1.2	激光淬火理论基础	165
5.1.3	发动机缸套激光淬火	170
5.1.4	齿轮的激光淬火	174
5.1.5	轴类零件的激光淬火	178
5.1.6	模具的激光淬火	180
5.2	激光熔覆技术	181
5.2.1	概述	181
5.2.2	激光熔覆工艺	182
5.2.3	常用激光熔覆材料	184
5.2.4	激光熔覆层的表面性能	189
5.2.5	激光熔覆层裂纹分析	191
5.2.6	激光熔覆的应用	193
5.3	激光毛化技术	194
5.3.1	概述	194
5.3.2	激光毛化原理	195
5.3.3	激光毛化装置及工艺	198
5.4	激光表面合金化技术	200
5.4.1	概述	200
5.4.2	表面合金化的强化机制	201
	参考文献	205
第6章	激光雕刻技术	207
6.1	激光雕刻原理	207
6.1.1	激光雕刻的基本原理	207
6.1.2	激光雕刻机的一般构造	209
6.1.3	激光雕刻方法	214
6.1.4	金属材料的激光雕刻	218
6.1.5	非金属材料的激光雕刻	221

6.2 激光雕刻在印染业中的应用	221
6.2.1 印刷辊筒的激光雕刻	221
6.2.2 纸箱印字版的激光雕刻	225
6.3 激光在印章、证卡业中的应用	227
6.3.1 印章的激光雕刻	227
6.3.2 激光雕刻防伪证卡	229
6.4 激光雕刻在工艺品中的应用	230
6.4.1 激光雕刻木材制品	230
6.4.2 激光雕刻工艺陶瓷	231
6.4.3 激光雕刻皮革	232
6.5 激光内雕技术	232
6.5.1 内雕用激光器	233
6.5.2 玻璃体的激光内雕技术	233
参考文献	235
第7章 激光打孔技术	237
7.1 激光打孔原理	237
7.1.1 激光打孔基本原理	237
7.1.2 激光打孔设备	242
7.1.3 激光打孔的精度分析	245
7.1.4 激光打孔的辅助工艺	254
7.2 激光打孔实例	256
7.2.1 喷丝头打孔	256
7.2.2 喷油嘴打孔	256
7.2.3 宝石轴承打孔	257
7.3 激光打孔与精密切割	258
7.3.1 金刚石片打孔切割	258
7.3.2 不锈钢管打孔切割	258
参考文献	260
第8章 飞秒激光加工技术	261
8.1 概述	261
8.2 飞秒激光微加工机理	262
8.2.1 飞秒激光微加工的多光子吸收	262
8.2.2 多光子吸收的阈值	262
8.2.3 飞秒激光微加工的实现原理	262
8.2.4 飞秒激光表面加工机理	263
8.2.5 透明材料内部微加工机理	263
8.2.6 双光子聚合机理	263
8.3 飞秒激光加工特点	264
8.3.1 等离子体屏蔽的回避	264
8.3.2 热扩散损失的回避	264
8.4 飞秒激光加工应用	264

8.4.1	飞秒激光的材料去除加工	264
8.4.2	飞秒激光脉冲对透明介质的材料去除微加工	272
8.4.3	飞秒激光对透明材料内部的三维加工和改性	273
8.4.4	双光子聚合	277
8.5	飞秒激光微纳加工系统	278
8.5.1	飞秒激光微纳加工系统的组成	278
8.5.2	飞秒激光加工用光源	279
8.5.3	飞秒激光参数的测定	280
8.5.4	飞秒激光加工的探测方法	282
8.6	飞秒激光加工研究及进展	282
8.6.1	国际飞秒激光加工的发展现状	282
8.6.2	我国飞秒激光加工的发展现状	283
8.6.3	微纳米加工用飞秒激光器发展趋势	283
	参考文献	283
第9章	激光快速成型技术	284
9.1	激光快速成型制造原理及应用	284
9.1.1	激光快速成型制造原理	284
9.1.2	微机控制激光快速成型	288
9.1.3	激光快速成型的应用	292
9.2	激光快速成型法	294
9.2.1	光敏树脂法	295
9.2.2	叠层法	302
9.2.3	烧结法	306
	参考文献	311
第10章	最新激光加工技术	312
10.1	激光修补	312
10.1.1	激光微调	312
10.1.2	存储器激光冗余修正	313
10.1.3	掩模版激光修补	314
10.2	激光光刻	314
10.3	激光清洗	315
10.3.1	轮胎模具激光清洗	315
10.3.2	硅片激光辅助清洗	316
10.3.3	激光清洗聚酰亚胺薄膜	317
10.3.4	集成电路组件激光消闪	317
10.3.5	集成电路组件激光退标	317
10.3.6	大型天文望远镜的清洗	318
10.3.7	磁头滑座空气轴承的清洗	318
10.3.8	艺术品激光清洗	318
10.3.9	激光脱漆	318
10.3.10	激光除锈和去氧化皮	321

10.3.11 激光去油脱脂	321
10.4 激光划片	321
10.5 激光引致分离	322
10.5.1 传统的玻璃和玻璃制品的切割方法	322
10.5.2 玻璃和玻璃制品的激光熔化切割方法	322
10.5.3 玻璃的第二代激光切割法	322
10.5.4 玻璃的第三代激光切割法——双激光法	324
10.6 激光加工高密度柔性线路板	325
10.7 脉冲激光溅射沉积薄膜技术	326
10.8 激光辅助化学气相沉积	326
10.9 激光强化电镀	327
10.10 激光退火非晶硅	327
参考文献	328

第 1 章 激光加工物理基础

激光是二十世纪自然科学的重大发明之一。1960 年世界上第一台激光器的诞生,使我们得到了地球上前所未有的相干光源。四十余年来,激光科学技术以其独有的特性和强大的生命力在国防、科技、工业、农业、医学、日常生活等几乎所有领域得到了迅速发展和广泛应用。在各领域应用激光的同时,形成了一系列新的应用技术领域和交叉学科,如非线性光学、光通信技术、激光加工技术、激光医疗和光子生物学、激光全息技术、超快光子学、激光检测和计量技术、激光化学、非线性频率变换技术、激光可控核聚变等。激光加工技术是一门交叉学科和综合技术,是激光、光学、机械学、电学、材料学、计算机技术的综合运用。

本章介绍以下内容:激光的物理基础,包括激光器工作原理、激光区别于普通光源的特性、激光器输出特性和激光加工中常用的激光技术以及激光加工的特点;激光与物质相互作用的物理基础,各种材料对激光的吸收,激光参数对激光加工的影响和激光加工过程的安全防护;各种常用的激光加工用激光器的结构和工作原理;常用的激光加工用光学系统,包括聚焦、匀光、导光等系统的激光加工用光学系统和高斯光束传播;常用的激光加工用数控系统。

1.1 激光物理基础

1.1.1 激光产生的机理

激光(Laser)是受激辐射的光放大(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation),是区别于普通光源的新型光源。普通光源的发光是以自发辐射为主,各个发光中心发出的光波无论方向、位相或者偏振态均不相同。激光的光发射则是以受激辐射为主,各个发光中心发出的光波都具有相同的频率、方向、偏振态和严格的位相关系。

1.1.1.1 原子的能级

各种发光现象,都与光源内部原子的运动状态有关,原子的运动状态改变了,其内能将相应改变,而物质的发光与内能直接有关。了解原子的能级结构,是研究发光现象的基础。

(1) 原子的结构

原子由原子核和电子组成,每个原子有一个带有正电荷的原子核和若干个带有负电荷的电子,这些电子在有限个可能的轨道上围绕核旋转。电子绕核旋转有一定的动能,电子被核吸引有一定的位能(势能),两者之和就是电子的内能。若由于外界的作用,使电子与核的距离增大,则内能增大,距离缩小,则内能减少。

(2) 原子的能级

玻尔假说指出,原子存在某些定态,在这些定态中不发出也不吸收电磁辐射,原子定态能量只能采取某些分立值 E_1 、 E_2 、……,这些定态能量的值称为能级。只有当原子从

一个定态跃迁到另一个定态时，才发出或吸收电磁辐射。按照光子假设，电磁辐射的最小单元是光子，其能量为 $h\nu$ 。

电子通过能级跃迁可以改变其轨道，当它从离核较远的轨道（高能级）跃迁到离核较近的轨道（低能级）上时就发射光子，而从离核较近的轨道跃迁到离核较远的轨道上时则需要吸收光子。每个跃迁对应一个特定的能量和波长。与跃迁对应的高能级能量 E_2 和低能级能量 E_1 满足关系式

$$E_2 - E_1 = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1-1)$$

式中， c 为真空中的光速， $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ； λ 为波长； ν 为频率； h 为普朗克常数， $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

(3) 能级的分布

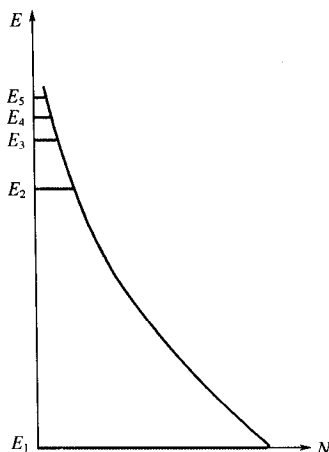


图 1-1 玻尔兹曼正则分布律

物质结构在热平衡状态下，各能级上原子的数目服从一定的规律。设原子体系的热平衡温度为 T ，在能级 E_n 上的原子数为 N_n ，则有

$$N_n \propto e^{-\frac{E_n}{kT}} \quad (1-2)$$

式中， k 为玻尔兹曼常数，该统计规律称为玻尔兹曼正则分布律。式 (1-2) 表明随着能量 E_n 的增高，粒子数 N_n 按指数规律递减，如图 1-1 所示。若设 E_1 和 E_2 分别为任意两个低能级和高能级，由玻尔兹曼正则分布律，两能级上原子数之比为

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}} < 1 \quad (1-3)$$

这也就是说，在热平衡状态下，低能级上的粒子数 N_1 总是高于高能级上的粒子数 N_2 。原子能级中能量最低的能级称为基态，其他的能级称为激发态。

1.1.1.2 受激辐射和自发辐射

(1) 激发过程和激发几率

正常情况下，大多数粒子处于基态，要使这些粒子产生辐射作用，必须把处于基态的粒子激发到高能级上去。通常采用光照、电子碰撞、分解或化合、加热等方式给原子输入一定的能量。例如，固体激光器可用闪光灯泵浦或用半导体激光器发出的激光泵浦方式；氦-氖激光器通过电子与原子的碰撞方式；化学激光器用分解或合成的方式等。

由于原子内部结构不同，相同的外界条件使原子从基态激发到各高能级的几率不同。通常把原子、分子或离子激发到某一能级上的可能性称为这一能级的激发几率。

(2) 自发辐射、受激辐射和受激吸收^[1]

自发辐射、受激辐射和受激吸收的跃迁过程如图 1-2 所示。

1917 年，爱因斯坦首先提出了受激辐射的基本概念，为 40 余年后激光的发明奠定了理论基础。

理论研究表明，光的发射过程分为两种，一种是在没有外来光子的情况下，处于高能级 E_2 的一个原子自发地向低能级 E_1 跃迁，并发射一个能量为 $h\nu$ 的光子，这种过程称为自发跃迁。由原子自发跃迁发出的光波称为自发辐射。自发跃迁过程用自发跃迁几率 A_{21}

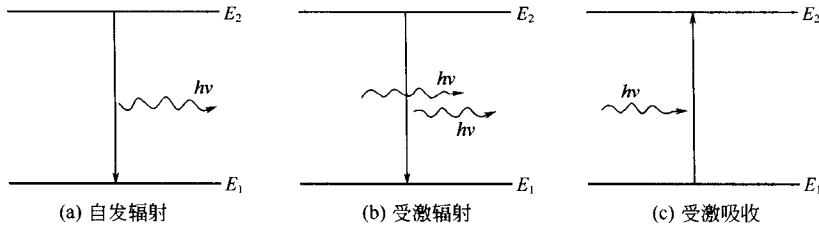


图 1-2 三种跃迁过程

描述。 A_{21} 定义为单位时间内 N_2 个高能级原子中发生自发跃迁的原子数与 N_2 之比，即

$$A_{21} = \left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{sp} \frac{1}{N_2} \quad (1-4)$$

式中， $(dN_{21})_{sp}$ 为因为自发跃迁由 E_2 向 E_1 跃迁的原子数。 A_{21} 也称为自发跃迁爱因斯坦系数。自发跃迁是一种只与原子本身性质有关而与辐射场无关的自发过程。自发跃迁几率 A_{21} 就是原子在能级 E_2 的平均寿命 τ_s 的倒数，即

$$A_{21} = \frac{1}{\tau_s} \quad (1-5)$$

自发辐射是个随机过程，大量原子的自发辐射场的相位是不相干的，辐射场的传播方向和偏振态也是无规分布。

另一种发射过程是处于高能级 E_2 上的原子在频率为 ν 的辐射场作用下，跃迁至低能级 E_1 并辐射一个能量为 $h\nu$ 的光子，这种过程称为受激辐射跃迁。受激辐射跃迁发出的光波称为受激辐射。受激辐射跃迁几率为

$$W_{21} = \left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{st} \frac{1}{N_2} = B_{21} \rho_\nu \quad (1-6)$$

式中， B_{21} 为受激辐射跃迁爱因斯坦系数； ρ_ν 为辐射场单色能量密度。 ρ_ν 定义为单位体积内，频率处于 ν 附近的单位频率间隔中的电磁辐射能量。受激辐射跃迁几率 W_{21} 不仅与原子性质有关，还与辐射场的 ρ_ν 有关。

处于低能级 E_1 的一个原子，在频率为 ν 的辐射场作用下，吸收一个能量为 $h\nu$ 的光子，跃迁至高能级 E_2 ，这种过程称为受激吸收跃迁。受激吸收跃迁几率为

$$W_{12} = \left(\frac{dN_{12}}{dt} \right)_{st} \frac{1}{N_1} = B_{12} \rho_\nu \quad (1-7)$$

式中， $(dN_{12})_{st}$ 为由于受激跃迁由 E_1 向 E_2 跃迁的原子数； B_{12} 为受激吸收跃迁爱因斯坦系数。受激吸收跃迁几率不仅与原子性质有关，还与辐射场的 ρ_ν 有关。

在热平衡状态下，腔内原子数按能级分布应服从热平衡状态下的玻尔兹曼分布，并且单位时间内由能级 E_1 向 E_2 跃迁的原子数与由能级 E_2 向 E_1 跃迁的原子数应当相等，即^[1]

$$\left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{sp} + \left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{st} = \left(\frac{dN_{12}}{dt} \right)_{st} \quad (1-8)$$

则三个爱因斯坦系数之间的比例关系为

$$B_{12} = B_{21}$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h \nu^3}{C^3} \quad (1-9)$$

受激辐射与自发辐射最重要的区别在于相干性。自发辐射是原子在不受外界辐射场控制情况下的自发过程,大量原子的自发辐射场的相位是不相干的,辐射场的传播方向和偏振态也是无规分布,而受激辐射是在外界辐射场控制下的发光过程,因此受激辐射场的频率、相位、传播方向和偏振态与外界辐射场完全相同。激光就是一种受激辐射的相干光。

(3) 能级的寿命

被激发到高能级上的原子是不稳定的,会很快地自发跃迁到低能级,它们在高能级(激发态)上的平均停留时间,称为原子在该能级上的平均寿命,简称为能级的平均寿命,通常用 τ_s 来表示,它是自发跃迁几率 A_{21} 的倒数。一般激发态能级的寿命很短,是 10^{-8} s数量级。

由于物质原子内部结构的不同,各个能级的平均寿命就不同,有的长,有的短。例如,红宝石晶体中铬离子的能级 E_3 的寿命很短,只有 10^{-9} s,但能级 E_2 的寿命却很长,为几个毫秒。这些寿命很长的能级称为亚稳态。在氢原子、氦原子、氩离子、铬离子、钕离子、二氧化碳分子等粒子中都有这种亚稳态能级。在这样的能级上,粒子的自发跃迁几率 A_{21} 很小,粒子相对稳定。这些亚稳态的存在,为激光的形成提供了重要条件。

上述能级的平均寿命实际是能级的自然寿命,仅是与自发跃迁过程对应的寿命。由于原子间存在碰撞或各种外界干扰等,会使原子的跃迁几率大为增加,因此,能级的实际寿命要比自然寿命小得多。

1.1.1.3 激光产生的机理——光的受激辐射放大

(1) 粒子数反转

光通过介质时,受激辐射和受激吸收同时存在,互相竞争。如果受激辐射的光子数多于受激吸收的光子数,即在 dt 时间内受激辐射和受激吸收的光子数之差 $dN_{21} - dN_{12} > 0$,则对外表现的是光的放大;如果受激吸收的光子数多于受激辐射的光子数,即 $dN_{21} - dN_{12} < 0$,则对外表现的是光的吸收。

如前所述,一般在热平衡状态下,低能级上的粒子数总是高于高能级上的粒子数。因此,当光通过介质时,受激吸收应当占优势,光子数减少,即通常对外表现的总是光的吸收。

高能级上的粒子数 N_2 大于低能级上的粒子数 N_1 时的状态称为粒子数反转。热平衡状态下实现粒子数反转是不可能的,只有当外界向介质提供能量时,使介质处于非平衡状态下,才可能实现粒子数反转。在这种状态下,若有一束光通过介质,而光子的能量恰好等于高低能级的能量差,就可以产生受激辐射,使输出的光能量超过入射的光能量,此时介质对光有增益作用。

产生粒子数反转分布的介质称为激活介质,通常称为激光器的工作物质。形成粒子数反转分布是产生激光的必要条件。

(2) 实现粒子数反转的条件

要实现粒子数反转,介质本身的能级结构应当存在亚稳态,以利于高能级上粒子数的积存,实现高能级上的粒子数 N_2 大于低能级上的粒子数 N_1 。同时必须采用外界激励方式向介质提供能量。对于不同类型的介质,实现粒子数反转的具体方式不同。外界激励的过程又称为泵浦。通常采用光激励、电激励、化学分解或化合等方式给介质输入一定的能量。

光激励常用于固体激光器,可以用脉冲氙灯、连续氙灯等闪光灯泵浦或用半导体激光

器发出的激光进行泵浦；电激励常用于气体激光器，如氦氖激光器是通过电子与原子的碰撞方式；化学激光器是用化学分解或合成的方式，将能量传给原子或分子，使其从基态激发到高能级上去，改变原子的运动状态和内能，从而使原子发光。

常用的能级系统有二能级系统、三能级系统、四能级系统等。二能级系统含有 E_1 和 E_2 两个能级，一般上能级 E_2 的寿命很短，难以实现粒子数反转。三能级系统含有 E_1 、 E_2 和 E_3 三个能级，如掺铬离子的红宝石晶体，是在亚稳态能级 E_2 和基态能级 E_1 两个能级间实现粒子数反转。四能级系统含有 E_0 、 E_1 、 E_2 和 E_3 四个能级，如掺钕离子的 YAG 晶体或钕玻璃，是在亚稳态能级 E_3 和低能级 E_2 两个能级间实现粒子数反转。由于在热平衡状态下，低能级 E_2 上的粒子数很少， E_2 和 E_3 两能级间容易实现粒子数反转，粒子在低能级 E_2 上停留时间很短，很快无辐射跃迁至基态 E_1 ，因此四能级系统比三能级系统更容易实现粒子数反转。三能级和四能级的工作模式如图 1-3 所示。

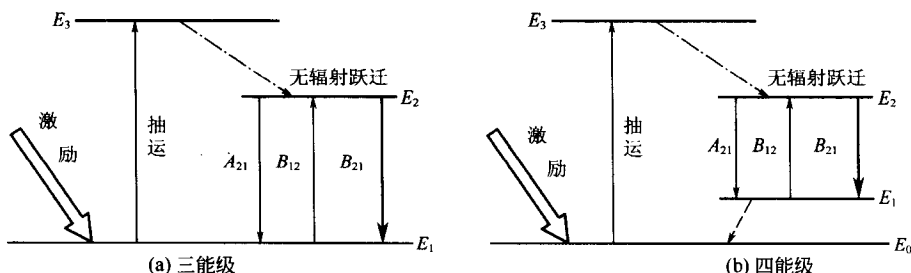


图 1-3 激活介质的工作模式

(3) 介质的增益作用

激活介质经外界泵浦实现粒子数反转后，对一定频率的光就具有放大作用，此时的激活介质称为增益介质。介质对光的放大能力用增益系数 G 来描述。如图 1-4 所示，一束光通过增益介质，设它在 $x=0$ 处的光强为 I_0 ，在 x 处的光强为 I ，在 $x+dx$ 处的光强为 $I+dI$ 。若为吸收，则有 $dI=-\alpha I dx$ ，其中 α 为介质的吸收率。若为放大，则有

$$dI = G I dx \quad (1-10)$$

$$G = \frac{dI}{I dx} \quad (1-11)$$

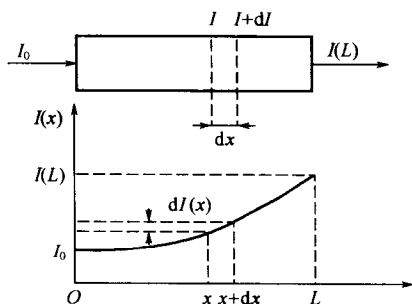


图 1-4 增益介质的光放大

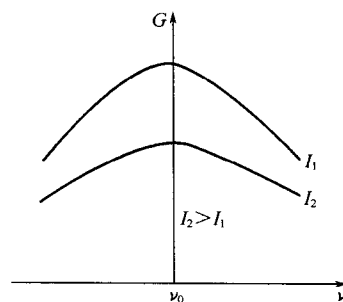


图 1-5 增益曲线

当光在增益介质中由 $x=0$ 处传播到 x 处时，出射光强与入射光强的关系由式 (1-10) 积分可得

$$I = I_0 e^{Gx} \quad (1-12)$$

式 (1-12) 表明，在增益介质中光强随距离按指数增长。增益 G 的大小与光强 I 和频