



江苏省“十二五”重点图书出版规划项目

先进激光制造技术

ADVANCED
LASER
MANUFACTURING
TECHNOLOGY

张永康 崔承云 肖荣诗 赵海燕 著



江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS



江苏省“十二五”重点图书出版规划项目

先进激光制造技术

张永康 崔承云 肖荣诗 赵海燕 著

ADVANCED
LASER
MANUFACTURING
TECHNOLOGY

图书在版编目(CIP)数据

先进激光制造技术/张永康等著. — 镇江: 江苏大学出版社, 2011. 12
ISBN 978-7-81130-300-1

I. ①先… II. ①张… III. ①激光加工 IV.
①TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 274382 号

先进激光制造技术 Xianjin Jiguang Zhizao Jishu

著 者/张永康 崔承云 肖荣诗 赵海燕

责任编辑/汪再非

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编:212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/<http://press.ujs.edu.cn>

排 版/丹阳市华鑫印务有限公司

印 刷/丹阳市兴华印刷厂

经 销/江苏省新华书店

开 本/787 mm × 1 092 mm 1/16

印 张/18

字 数/425 千字

版 次/2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-81130-300-1

定 价/43.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

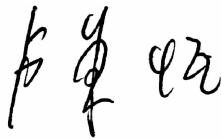
序 一

制造技术水平与国家经济发展速度密切相关,制造技术革新将为社会创造大量的物质财富。先进激光制造技术因具有传统制造技术无法比拟的优势,已得到深入研究与发展,并逐渐应用到高新技术领域与各相关产业,对推动社会发展、提高国家制造业的市场竞争力具有重要作用。张永康博士等人著写了《先进激光制造技术》一书,这为相关学习与研究的人员提供了一本全面、系统介绍激光制造技术及其最新发展状况的教材和参考书。

该书主要著者张永康博士长期从事激光制造与海洋工程装备先进制造方面的研究,在激光技术领域重点开展了激光冲击波抗疲劳制造、激光冲击波成形、界面结合强度激光检测以及激光珩磨等方面的研究。该书主要体现了其与合著者近几年的科研成果,内容新颖,结构合理,理论严谨,能够为读者提供最新的激光制造科研动态信息和实验依据,具有很强的指导意义和重要的学术参考价值。

特此向广大读者推荐此书。是为序。

中国工程院院士



序 二

激光制造技术是涉及光、机、电、材料、计算机、数控及检测等多领域的高新技术,具有传统加工制造技术无法企及的众多优势,对制造技术的进步和制造业的结构调整和升级换代具有强有力的推动作用。为了进一步促进激光制造技术在我国的研究和应用,展现近期激光制造技术的研究进展,张永康、肖荣诗、崔承云和赵海燕4位博士以自己的科研成果为基础撰写了《先进激光制造技术》一书。

该书著者张永康等4位博士通过对激光制造的基本理论与技术的长期研究,在激光与材料相互作用机理,激光冲击先进制造,激光珩磨,激光熔覆和熔凝,激光焊接力学,激光焊接及连接过程的数值模拟与质量控制,表界面性能激光检测等方面的基础理论、技术、工艺装备及其应用,以及激光制造新原理方面,均取得了创新并有特色的理论及应用性研究成果。该书不仅是4位作者多年科研成果的积累和总结,也是一本理论性与实用性很强,内容新颖,重点突出,具有一定的广度和深度的专著,对从事激光制造技术研究和应用的技术人员、科研工作者以及高等院校师生具有较高的实用参考价值,对推动激光制造技术与体系的发展与应用具有重要意义。

中国工程院院士

郭东明

前 言

先进激光制造技术是利用光子与材料相互作用实现加工制造的重要光制造技术,是集光学、机械学、电子学、材料学及计算机等众多学科的综合交叉高新技术。随着工业激光技术的大力发展,先进激光制造技术在各高新技术领域的应用越来越广泛,已逐渐取代和突破某些传统制造技术,成为现代制造业中重要的技术手段之一。

随着全面转型的“十二五”规划序幕的拉开,先进激光制造技术在我国制造业中起着越来越重要的作用。国家中长期科学和技术发展规划中将先进激光制造技术列为激光技术中长期发展的重点任务之一;国家自然科学基金委员会发布的《机械工程科学发展战略研究报告(2011—2020)》也将以先进激光制造技术为代表的“高能束与特种能场制造科学”列为未来机械工程学科发展的综合交叉前沿领域之一。伴随着这些科技政策的实施,我国的先进激光制造技术水平将得到迅猛发展,我国制造业的技术水平和市场竞争力也将得到显著提高,进而推动我国从制造大国迈向制造强国。

先进激光制造技术涉及的面很广,主要包括激光熔覆、表面合金化、表面熔凝、冲击强化、焊接、切割和激光冲击成形等加工和成形技术。本书著者长期从事激光制造方面的研究,其中,张永康博士,东南大学特聘教授,从事激光冲击抗疲劳制造、激光冲击成形、界面结合强度的激光检测以及激光珩磨等方面的研究;肖荣诗博士,北京工业大学教授,从事激光与材料相互作用、先进材料的激光制造、激光制造的新原理、新工艺、新方法、新技术及外围系统等方面的研究;崔承云博士,从事激光熔覆和激光表面熔凝等方面研究;赵海燕博士,从事高能激光束深熔焊接过程的建模和数值模拟以及焊接力学行为机理等方面研究。本书以著者的科研成果为主体著写而成,是著者及其研究集体对激光技术实际应用的实验和实践总结,具有一定的广度和深度。本书主要深入浅出地讲述了各种激光制造技术的原理、工艺、结构、性能以及相关理论,内容丰富新颖,力求便于读者学习和阅读,能够从中获益。本书面向激光技术研究和应用的学者与技术人员以及高等院校相关专业师生,著者期望本书的出版能产生其专业领域的指导作用和应用价值。

本书共分 11 章,重点介绍著者近几年在常用激光制造技术方面的科研成果;同时,为了使本书内容能够保持系统性和完整性,还将近几年国内外公开发表的有关激光制造方面的成果吸纳进来,为读者提供全面的科研动态和理论知识。书中第 1 章简要叙述了激光制造技术基础,包括激光产生的物理基础、激光模式和常用激光器;第 2 章概述了先进激光制造技术的分类、新领域以及特点;第 3 章至第 11 章顺序介绍了激光熔覆、激光表面合金化、激光非晶化、激光熔凝、激光冲击强化、激光焊接、激光切割、激光微细加工和激光冲击成形技术等。其中,第 4 章激光表面合金化部分是孙桂芳博士所著,第 10 章激光微细加工部分是符永宏博士所著。

在本书即将出版之际,著者要感谢张朝阳博士等人,他们为本书的完成提供了有价值的图片和内容,感谢北京工业大学吴世凯博士为本书提供的帮助,感谢著者的研究生为本书科研成果作出的贡献,感谢本书参考文献中所列的作者,他们的科研成果丰富了本书的内容。

本书的出版得到了江苏大学研究生处及出版社的大力支持,在此表示衷心的感谢。由于著者水平有限,书中难免存在不当和错误,敬请广大读者批评指正。

著 者
2011 年 12 月

目 录

第 1 章 激光制造技术基础

- 1.1 激光产生的物理基础 / 001
 - 1.1.1 激光产生所涉及的物理概念 / 001
 - 1.1.2 激光产生过程 / 007
 - 1.1.3 激光的特点 / 007
- 1.2 激光模式 / 008
 - 1.2.1 纵模 / 009
 - 1.2.2 横模 / 009
- 1.3 激光器 / 010
 - 1.3.1 激光器的基本结构 / 010
 - 1.3.2 激光器的分类 / 012
- 参考文献 / 022

第 2 章 激光制造技术概述

- 2.1 激光制造技术分类 / 023
- 2.2 激光制造技术新领域——激光成形 / 028
- 2.3 激光制造技术特点 / 029
- 参考文献 / 029

第 3 章 激光熔覆

- 3.1 激光熔覆概述 / 031
 - 3.1.1 激光熔覆概念及特点 / 031
 - 3.1.2 激光熔覆材料与方法 / 032
- 3.2 激光熔覆层几何形状特征 / 033
- 3.3 激光熔覆层形状和质量的影响因素 / 033
 - 3.3.1 激光工艺参数对单道单层激光熔覆宏观质量的影响 / 033
 - 3.3.2 激光工艺参数对多道单层激光熔覆宏观质量的影响 / 036
 - 3.3.3 激光工艺参数对单道多层激光熔覆宏观质量的影响 / 037

- 3.3.4 激光工艺参数对多道多层激光熔覆宏观质量的影响 / 038
- 3.4 激光熔覆层微观结构 / 038
- 3.5 激光熔覆层性能 / 041
 - 3.5.1 激光熔覆层硬度和耐磨性能 / 041
 - 3.5.2 激光熔覆层耐蚀性能 / 043
- 3.6 激光熔覆层缺陷 / 044
 - 3.6.1 激光熔覆层裂纹 / 044
 - 3.6.2 激光熔覆层气孔 / 046
- 3.7 激光熔覆技术研发的重点 / 047
- 参考文献 / 048

第4章 激光表面合金化

- 4.1 激光表面合金化概述 / 049
 - 4.1.1 激光表面合金化及特点 / 049
 - 4.1.2 激光表面合金化选材原则 / 050
 - 4.1.3 激光表面合金化送粉方式 / 050
 - 4.1.4 激光表面合金化质量控制 / 053
- 4.2 激光表面合金化工艺参数的影响 / 054
 - 4.2.1 激光功率对合金化层形貌的影响 / 054
 - 4.2.2 扫描速度对合金化层组织形貌的影响 / 055
- 4.3 激光表面合金化层微观组织结构 / 056
 - 4.3.1 合金化层组织 / 056
 - 4.3.2 合金化层结构缺陷 / 058
- 参考文献 / 058

第5章 激光表面熔化(一):激光非晶化

- 5.1 非晶合金 / 060
- 5.2 激光非晶化概述 / 061
 - 5.2.1 激光非晶化及特点 / 061
 - 5.2.2 激光非晶化的形成条件 / 061
- 5.3 影响激光非晶化临界冷却速度的因素 / 064
 - 5.3.1 激光功率密度 / 065
 - 5.3.2 激光扫描速度 / 065
 - 5.3.3 光束处理方式 / 066
- 5.4 激光非晶化今后的研究方向 / 066
- 参考文献 / 066

第6章 激光表面熔化(二):激光熔凝

- 6.1 激光熔凝概述 / 068

- 6.1.1 激光熔凝概念与特点 / 068
- 6.1.2 激光熔凝层形状特征 / 069
- 6.1.3 激光熔凝材料表面的吸光涂料 / 070
- 6.2 激光熔凝层温度场模拟 / 071
 - 6.2.1 激光在材料表面的热作用 / 072
 - 6.2.2 激光加热冷却过程分析 / 072
- 6.3 影响激光熔凝层质量的因素 / 081
 - 6.3.1 气体保护对熔凝层表面质量的影响 / 081
 - 6.3.2 激光入射角度对熔凝层截面质量的影响 / 088
- 6.4 激光熔凝层微观结构 / 090
 - 6.4.1 激光熔凝表面宏观组织和成分分析 / 090
 - 6.4.2 激光熔凝表面微观组织扫描电镜分析 / 094
 - 6.4.3 激光熔凝表面微观组织透射电镜分析 / 096
 - 6.4.4 激光熔凝层截面显微组织分析 / 098
- 6.5 激光熔凝层性能 / 099
 - 6.5.1 表面层显微硬度 / 100
 - 6.5.2 表面摩擦磨损性能 / 103
 - 6.5.3 表面耐腐蚀性能 / 108
- 6.6 激光熔凝层缺陷 / 118
 - 6.6.1 裂纹 / 118
 - 6.6.2 气孔 / 119
 - 6.6.3 夹杂物 / 119
- 参考文献 / 120

第7章 激光冲击强化技术

- 7.1 激光冲击概述 / 122
 - 7.1.1 激光冲击基本原理及过程 / 122
 - 7.1.2 激光冲击强化工艺特点 / 123
 - 7.1.3 国内外研究状况 / 124
- 7.2 激光冲击处理工艺方法研究 / 126
 - 7.2.1 激光设备与外部光路选择 / 126
 - 7.2.2 激光冲击处理光束参数选择 / 130
 - 7.2.3 约束层选择研究 / 132
 - 7.2.4 吸收层选择研究 / 134
- 7.3 激光冲击作用下材料内部应力波传播特性 / 137
 - 7.3.1 激光诱导等离子体冲击波产生机理 / 138
 - 7.3.2 激光冲击作用下应力波传播特性 / 140
 - 7.3.3 材料在激光脉冲辐照下的力学响应及其应变速率效应 / 143
- 7.4 激光冲击层微观结构 / 144

- 7.4.1 激光冲击 AZ31B 镁合金表面形貌 / 145
- 7.4.2 激光冲击 AZ91 镁合金表面形貌 / 150
- 7.5 激光冲击层性能 / 154
 - 7.5.1 硬度 / 154
 - 7.5.2 耐腐蚀性能 / 155
 - 7.5.3 残余应力 / 158
- 参考文献 / 159

第8章 激光焊接

- 8.1 激光焊接概述 / 160
 - 8.1.1 激光焊接含义 / 160
 - 8.1.2 激光焊接特点 / 161
- 8.2 激光焊接系统 / 161
 - 8.2.1 激光器 / 161
 - 8.2.2 光束传输与聚焦系统 / 164
 - 8.2.3 运动系统 / 165
- 8.3 激光焊接工艺技术 / 167
 - 8.3.1 激光深熔焊接 / 167
 - 8.3.2 采用填充焊丝的激光焊接 / 170
 - 8.3.3 采用填充粉末的激光焊接 / 172
 - 8.3.4 激光钎焊 / 174
 - 8.3.5 激光-电弧复合焊接 / 174
- 8.4 金属材料的激光焊接 / 177
 - 8.4.1 金属材料的激光焊接性 / 177
 - 8.4.2 钢的激光焊接 / 179
 - 8.4.3 铝合金的激光焊接 / 181
 - 8.4.4 钛合金的激光焊接 / 184
 - 8.4.5 镁合金的激光焊接 / 187
 - 8.4.6 异种材料的激光焊接 / 188
- 8.5 激光焊接的工业应用 / 193
- 参考文献 / 196

第9章 激光切割

- 9.1 激光切割技术概述 / 197
 - 9.1.1 激光切割原理及切割过程 / 197
 - 9.1.2 激光切割分类 / 202
 - 9.1.3 激光切割技术的特点 / 203
 - 9.1.4 影响激光切割质量的因素 / 205
 - 9.1.5 激光切割质量的评定指标 / 208

- 9.2 激光切割实验研究 / 213
 - 9.2.1 激光切割 Q235 钢板 / 213
 - 9.2.2 激光切割铝合金 / 217
 - 9.2.3 激光切割碳化硼陶瓷 / 218
- 9.3 激光切割技术研究的主要问题 / 220
- 参考文献 / 221

第 10 章 激光微细加工

- 10.1 激光微细加工概述 / 222
- 10.2 激光微细加工技术的特点 / 223
- 10.3 金属材料的激光微细加工 / 224
 - 10.3.1 激光器的选择 / 224
 - 10.3.2 “单脉冲同点间隔多次”激光微细加工新工艺 / 229
 - 10.3.3 激光微细加工过程的温度场模拟计算 / 233
 - 10.3.4 激光微细加工的实验研究 / 241
- 10.4 展望 / 249
- 参考文献 / 250

第 11 章 激光冲击成形技术

- 11.1 激光冲击成形技术概述 / 251
 - 11.1.1 激光冲击成形基本原理 / 252
 - 11.1.2 激光冲击成形技术特点 / 253
- 11.2 激光冲击成形冲击波的形成机理 / 254
 - 11.2.1 激光冲击波加载特征 / 254
 - 11.2.2 激光冲击波施加于板料的冲量 / 255
- 11.3 金属薄板激光冲击半模成形 / 256
 - 11.3.1 研究对象和实验内容 / 256
 - 11.3.2 激光冲击半模成形薄板运动方程 / 259
 - 11.3.3 激光冲击半模成形精度影响因素 / 260
 - 11.3.4 激光冲击半模成形实验分析 / 261
 - 11.3.5 激光冲击半模成形数值模拟 / 267
 - 11.3.6 激光冲击半模成形研究意义 / 274
- 参考文献 / 275

第1章

激光制造技术基础

激光是20世纪以来,继原子能、计算机、半导体之后,人类的又一重大发明,被称为“最快的刀”、“最准的尺”、“最亮的光”和“奇异的激光”。

1.1 激光产生的物理基础

激光最初的中文也称作“镭射”、“莱塞”,是其英文名称 LASER 的音译, LASER 是取自英文 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 各单词第一个字母组成的缩写词,即指辐射的受激发射光放大。激光的英文全名已经完全表达了产生激光的主要过程,它是量子力学对原子在能级间的激发和辐射规律研究及应用的直接结果,也是现代物理学的一个重大成果。1960年,美国物理学家梅曼研制成功世界上第一台可实际应用的红宝石激光器,标志着激光技术的诞生。

1.1.1 激光产生所涉及的物理概念

1. 原子能级

1911年英国科学家卢瑟福提出了原子模型:原子中间是原子核,电子围绕原子核不停地旋转,同时也不停地自转。1913年,丹麦物理学家玻尔提出了原子只能处于由不连续能级表征的一系列状态——定态上,这与宏观世界中的情况大不相同。人造卫星绕地球旋转时,可以位于任意的轨道上,也就是说可具有任意的连续变化的能量。而电子在绕核运动时,却只能处于某些特定的轨道上,原子的内能不能连续地改变,而是一级一级分开的,这样的级就称为原子能级,用 E_1, E_2, \dots, E_n 表示,如图 1-1 所示。

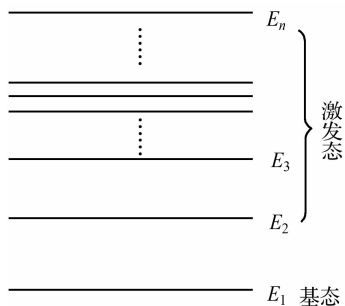


图 1-1 原子能级示意图

不同的原子具有不同的能级结构。一个原子中最低的能级称为基态,其余比基态能量高的能级称为高能态或激发态。

2. 原子能级跃迁

原子能量的任何变化(吸收或辐射)都只能在某两个定态之间进行,原子的这种能量变化过程称为跃迁。当原子吸收或辐射一定的能量时,电子就从某一轨道跳到另一轨

道,而电子从某一轨道跃迁到另一轨道,对应着原子就从一个能量状态(定态)跃迁到另一个能量状态(定态),像这样随电子轨道变化,能量随之变化的过程称为原子的能级跃迁。

(1) 光子使原子能级跃迁的条件

具有一定能量的光子可以使处于某一定态的原子跃迁,根据玻尔的原子模型3条基本假设认为:原子从一个定态(初始能量数值为 E_m)跃迁到另一定态(终态能量数值为 E_n)时,原子将吸收或辐射一定频率 ν 的光子,辐射或吸收的光子能量数值不是任意的,而是由这两个定态的能级之差决定,即光子的频率满足^[1]

$$h\nu = E_m - E_n \quad (1-1)$$

其中, h 为普朗克常数, $6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$; ν 为频率,Hz。

根据量子理论观点,光子是一份一份的,光子的能量 $h\nu$ 也是一份一份的,每一份光子的能量均是不可分裂的整体。光子作用到原子上能使原子跃迁,也就是光子使原子共振,就必须使光子的能量等于发生跃迁的两个能级的能量差值。光子的能量大于或小于这个值,均不能使原子发生共振,也就不能跃迁^[2,3]。

(2) 电子使原子能级跃迁的条件

电子使原子跃迁不是通过共振来实现的,而是通过碰撞实现的。电子能量不是一份一份的,当电子速度增大到一定数值时,电子与原子的碰撞是“非弹性”的。当电子与静止的原子碰撞时,电子的动能可全部被原子吸收,使原子从一个较低的能级跃迁到另一个较高的能级,原子从电子中所攫取的能量只是两能级的能量之差。因此,电子具有的动能必须大于或等于原子两个能级之差^[2,3]。

(3) 原子或分子使原子能级跃迁的条件

当原子或分子与原子碰撞时也可以使原子发生能级跃迁。当两个粒子碰撞时,如果只有粒子平移能量的交换,内部能量不变,这被称为“弹性”碰撞;当两个粒子碰撞时,原子或分子的内部能量有增减,这被称为“非弹性”碰撞。“非弹性”碰撞又有两种,如果部分能量转变为内部能量,使原子被激发跃迁,就是第一种“非弹性”碰撞;如果在碰撞时原子内部能量降低,放出的部分能量转变为平移能量,就是第二种“非弹性”碰撞。当粒子平移动能较小时,它们之间只能有“弹性”碰撞,当粒子平移动能足够大,使原子能够吸收能量从原有的低能级被激发到高能级就能发生第一种“非弹性”碰撞。如果两个粒子动能不大,就有可能发生第二种“非弹性”碰撞,使原子从高能级跃迁到低能级,相差的能量转变为粒子的动能。所以若原子与原子碰撞使原子发生跃迁,必须使原子具有的动能比被激发跃迁的能级数值之差大得多才能发生^[4]。

(4) 电离——一种特殊的原子能级跃迁

电离是指将电子从基态激发到脱离原子。它属于原子能级的跃迁,只是原子从基态($n=1$)跃迁到最高能级状态($n=\infty$),也就是电子从离核最近的轨道跃迁到离核最远的轨道(脱离原子核),电离过程所需能量称为电离能。当光子和原子作用使原子电离时,不再受公式(1-1)的限制。这是因为原子一旦电离,原子结构即被破坏,因而不遵守有关原子结构的理论。当原子吸收的能量等于电离能时,原子恰被电离;若吸收的能量大于电离能,原子被电离,且电离出的电子具有动能,其动能等于吸收的能量与电离能的差值;若吸收的能量小于电离能,则不会发生电离现象^[3,5]。

3. 自发辐射、受激辐射、受激吸收

激光产生的理论基础早在 1916 年就已经由爱因斯坦奠定了^[1], 他从辐射与原子相互作用的量子论观点出发, 提出光与物质有三种相互作用的基本形式: 自发辐射、受激辐射和受激吸收。

(1) 自发辐射

处于激发态的原子是不稳定的, 常常在没有任何外界作用的情况下, 会自发地通过发射光子或其他形式放出能量而跃迁到低能态, 如图 1-2 所示。处于高能态 E_2 的原子向低能态 E_1 跃迁, 根据能量守恒原理, 在跃迁过程中辐射出能量为 $h\nu = E_2 - E_1$ 的光子, 这一过程称为自发辐射。自发辐射是一种随机的发射过程, 各个原子都是自发地、独立地进行的, 因而各个光子的发射方向和初相位都不相同。此外, 由于大量原子所处的激发态不尽相同, 所以发出光子的频率也不相同。普通光源发光就属于自发辐射, 所以普通光源发的光没有相干性。

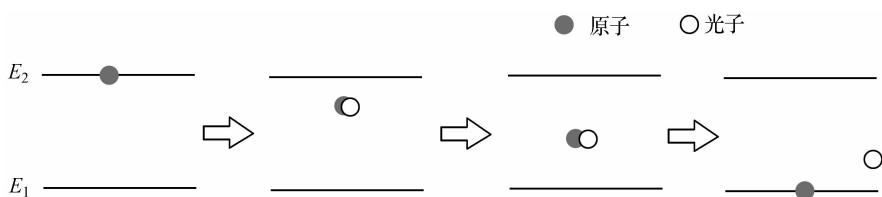


图 1-2 自发辐射过程示意图

一般资料中常用图 1-3 来说明自发辐射过程。

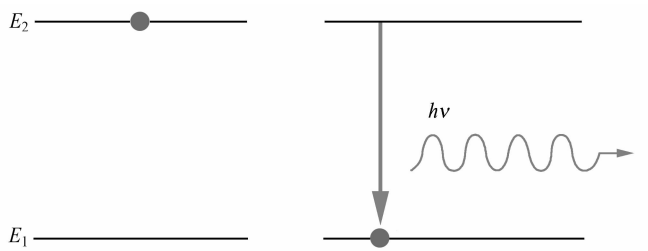


图 1-3 自发辐射过程

(2) 受激辐射

受激辐射的概念是爱因斯坦在推导普朗克的黑体辐射公式时, 第一个提出来的。他从理论上预言了原子发生受激辐射的可能性, 这是激光的基础。受激辐射是指处于激发态 E_2 上的原子, 受外来光子的作用, 当外来光子的频率正好与它的跃迁频率一致时, 它就会从 E_2 能级跃迁到 E_1 能级 (高能级跳到低能级), 根据能量守恒原理, 同时辐射出与外来光子完全相同的光子, 并满足 $h\nu = E_2 - E_1$, 这个过程见图 1-4。

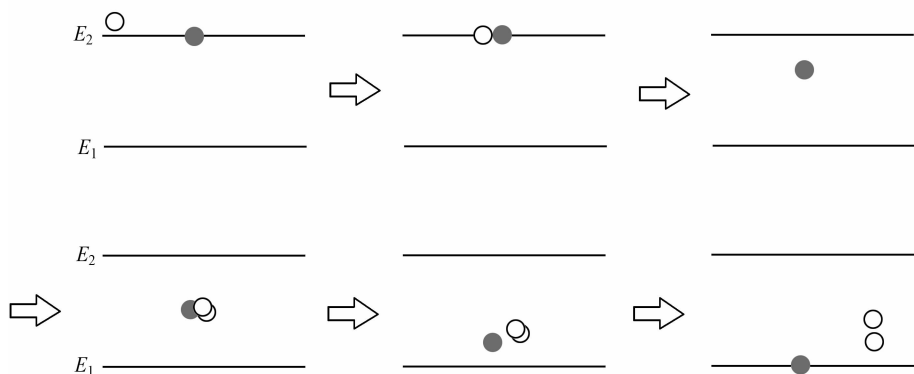


图 1-4 受激辐射过程示意图

同样,受激辐射过程可用图 1-5 来说明。

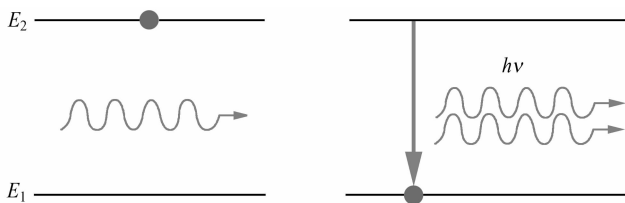


图 1-5 受激辐射过程

入射一个光子引起一个激发原子受激跃迁,在跃迁过程中,辐射出两个同样的光子,这两个同样的光子又去激励其他激发原子发生受激跃迁,因而又获得四个同样的光子。如此下去,在很短的时间内,如果高能态的原子数足够多,就可以辐射出来大量状态完全相同的光子^[1],这个过程称为“雪崩”。雪崩是受激辐射光的放大过程,光的受激辐射过程就是产生激光的基本过程,见图 1-6。受激辐射光是相干光,相干光有叠加效应,因此合成光的振幅加大,表现为光的高亮度性。

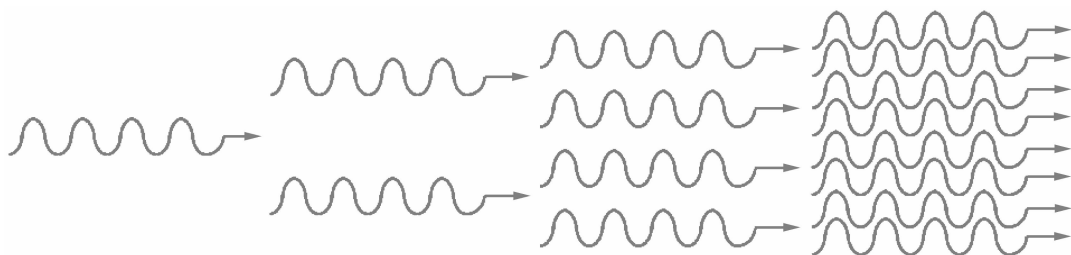


图 1-6 光的放大过程示意图

(3) 受激吸收

受激吸收与受激辐射的过程正好相反,是指处于低能级 E_1 上的原子如果吸收了一个能量恰好为 $h\nu = E_2 - E_1$ 的光子,就能跃迁到能量为 E_2 的激发态,此过程称为受激吸收,如图 1-7 所示。这就是一般物质对光有一定吸收的原因。

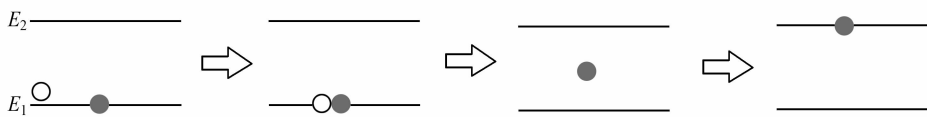


图 1-7 受激吸收过程示意图

自发辐射过程中每一个原子的跃迁是自发地、独立进行的,其过程全无外界的影响,彼此之间也没有关系,只与物质本身的性质有关,而且它们发出的光子的状态各不相同,这样的光相干性差,方向散乱。而受激辐射则相反,它最大特点是由受激辐射产生的光子与引起受激辐射的原来的光子具有完全相同的状态,具有相同的频率,相同的方向,完全无法区分出两者的差异。这样,通过一次受激辐射,一个光子变为两个相同的光子。这意味着光被加强了,或者说光被放大了。某原子自发辐射产生的光子对于其他原子来讲是外来光子,会引起受激辐射与吸收。因此,上述三个过程在大量原子组成的系统中是同时发生的。

4. 粒子数反转

(1) 粒子数反转

在一般的热平衡状态下,物质各能级的粒子数按照玻耳兹曼统计分布,即^[6]:

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-\frac{(E_2 - E_1)}{kT}} \quad (1-2)$$

其中, n_1, n_2 分别为低能级 E_1 , 高能级 E_2 上的粒子数; E_1, E_2 分别为低能级和高能级的能量; k 为玻耳兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 为热力学温度, K 。

因为 $E_2 > E_1, h\nu > 0, T > 0$, 故两能级上的粒子数之比:

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-\frac{(E_2 - E_1)}{kT}} < 1 \quad (1-3)$$

即 $n_2 < n_1$, 表明在热平衡状态下高能级上的粒子数总是小于低能级上的粒子数,且两者的比例取决于体系的温度。一般地,在热平衡状态下,几乎所有的粒子都处于最低能态——基态,只有少数粒子处于较高的能级状态——激发态,所以受激吸收占主导地位。这种 $n_2 < n_1$ 的分布通常称为粒子数的正常分布,如图 1-8a 所示。

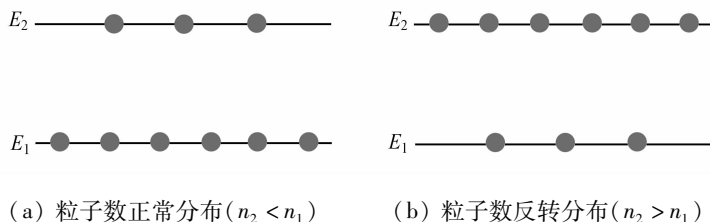


图 1-8 粒子数分布示意图

热平衡条件下高能级的粒子数始终少于低能级的粒子数,若有一束频率为 ν 的光通过物质时,所吸收的光子数将恒大于受激发射的光子数。因此,处于热平衡条件下的物质无法实现受激辐射的光放大,这种情况得不到激光。要实现光放大,得到激光,就必须打破粒子数在热平衡下的玻耳兹曼分布,使高能级 E_2 上的粒子数大于低能级 E_1 上的粒