

激光原理与应用

JIGUANG YUANLI YU YINGYONG

杨玉玲 编著



化学工业出版社

JIGUANG YUANLI YU YINGYONG

激光原理与应用

杨玉玲 编著



化学工业出版社

·北京·

本书首先对激光产生的物理基础；光与物质相互作用及机理、谱线加宽机制、速率方程组理论以及介质对光的增益；光学谐振腔的几何理论、激光振荡的形成及输出特性；光学谐振腔的衍射理论等基础知识进行了介绍。然后对改善激光器特性的各种技术以及激光在各领域的应用等进行了论述。

本书可供从事应用物理、光电子等研发的科研人员和技术人员参考，也可作为相关专业的本科生教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

激光原理与应用/杨玉玲编著. —北京: 化学工业出版社, 2015. 2

ISBN 978-7-122-22742-3

I. ①激… II. ①杨… III. ①激光理论②激光应用
IV. ①TN24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 007148 号

责任编辑: 赵卫娟
责任校对: 边 涛

装帧设计: 刘剑宁

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 13¼ 字数 241 千字 2015 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书是在编者多年科研和教学实践基础上编写而成，特别注重物理概念的清晰阐述和理论的系统性、严谨性。在编写过程中，既考虑了光电子领域对激光原理与应用方面知识体系和内容的需求，也考虑了非光电子领域的实际需要，同时，广泛吸收了国内外相关图书的长处，力求使本书自成系统，在内容上注意选材和取舍，由浅入深，以便使读者更好地理解。

本书共 6 章。第 1 章概述了激光产生的物理基础。第 2 章介绍了光与物质相互作用及机理，包括受激吸收、受激辐射和自发辐射等理论知识，谱线加宽机制，速率方程组理论以及介质对光的增益。第 3 章主要论述了光学谐振腔的几何理论、激光振荡的形成及输出特性等。第 4 章介绍了光学谐振腔的衍射理论，并在此基础上介绍了高斯光束的特性及其传播规律。第 5 章介绍了改善激光器特性的各种技术（包括选模技术、稳频技术、调 Q 技术）的原理和理论。第 6 章介绍了激光在各领域的应用。

本书可作为应用物理、光电子等相关专业的本科生教材，也希望有益于相关科研人员和技术人员。在本书的编写过程中，参考了许多国内外相关图书及参考文献，这些对本书知识体系和知识内容的完善具有重大意义。作者在此对引文作者一并表示衷心感谢。

本书获得了东北大学“十二五”规划教材资助，在此，作者对东北大学教务处给予的资助表示诚挚的感谢。

本书由东北大学杨玉玲编写。由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，殷切希望使用本书的高等院校师生及激光界同行批评指正。

编著者
2015 年 1 月

目 录

CONTENTS

第1章 激光产生的物理基础	1
1.1 光的本质及激光的发展	1
1.1.1 光的本质	1
1.1.2 激光的发展简史	2
1.2 产生激光的能级理论	4
1.2.1 原子能级和简并度	4
1.2.2 单个原子的原子态及能级结构	5
1.2.3 能级跃迁理论	6
1.2.4 多原子系统的粒子分布	8
1.3 量子态的基本假设	9
1.3.1 光子的基本性质	9
1.3.2 光子的相干性	10
1.3.3 光波模式和光子态	12
1.3.4 光子简并度	15
1.3.5 激光的模式	15
1.4 激光的产生及特性	19
1.4.1 激光产生过程	19
1.4.2 激光器基本组成及类型	20
1.4.3 激光的特性	32
第2章 光与物质相互作用及机理	35
2.1 黑体辐射与普朗克公式	35
2.2 光与物质相互作用及爱因斯坦关系式	37
2.2.1 自发辐射	37
2.2.2 受激吸收	39
2.2.3 受激辐射	40
2.2.4 爱因斯坦三系数的关系	41
2.2.5 自发辐射与受激辐射的光功率	42

2.3	谱线加宽机制	42
2.3.1	光谱线的线型和线宽	42
2.3.2	均匀加宽	44
2.3.3	非均匀加宽	49
2.3.4	均匀加宽与非均匀加宽线型比较	52
2.3.5	综合加宽	53
2.4	速率方程组理论	53
2.4.1	修正的爱因斯坦三系数	53
2.4.2	三能级系统的速率方程组	54
2.4.3	四能级系统的速率方程组	56
2.5	稳态条件下粒子数密度反转分布及增益系数	58
2.5.1	小信号条件下反转粒子数分布	58
2.5.2	均匀加宽介质小信号增益系数	60
2.5.3	非均匀加宽介质小信号增益系数	61
2.5.4	均匀加宽大信号反转粒子数密度分布	62
2.5.5	反转粒子数密度的饱和效应	63
2.5.6	均匀加宽大信号增益系数	66
2.5.7	非均匀加宽大信号反转粒子数密度分布	69
2.5.8	非均匀加宽大信号增益系数	71
第3章 光学谐振腔的几何理论及输出特性		74
3.1	光学谐振腔的几何理论——光学变换矩阵	74
3.1.1	光线在自由空间传播的光学变换矩阵	75
3.1.2	光线经球面镜反射的光学变换矩阵	75
3.1.3	共轴球面谐振腔的光学变换矩阵	77
3.2	光学谐振腔的稳定性条件及其分类	78
3.2.1	光学谐振腔的稳定性条件	79
3.2.2	稳区图及其应用	80
3.2.3	共轴球面腔分类	82
3.3	光学谐振腔的损耗	84
3.3.1	平均单程损耗因子 δ	85
3.3.2	谐振腔的寿命 τ_c	88
3.3.3	谐振腔的品质因数 Q	90
3.4	激光形成的阈值条件	93
3.4.1	阈值增益系数	93
3.4.2	阈值反转粒子数密度	94

3.4.3	激光上能级阈值粒子数密度	95
3.4.4	连续或长脉冲激光器的阈值泵浦功率	96
3.4.5	短脉冲激光器的阈值泵浦功率	97
3.5	模式竞争	98
3.5.1	起振模式数计算	98
3.5.2	均匀加宽激光器中的模式竞争	99
3.5.3	非均匀加宽激光器中的模式竞争	102
3.6	激光器的输出特性	103
3.6.1	连续或长脉冲激光器的输出功率	103
3.6.2	单模激光器的线宽极限	106
第4章	光学谐振腔的衍射理论	110
4.1	光学谐振腔的衍射理论——菲涅耳衍射积分方程	110
4.1.1	菲涅耳-基尔霍夫衍射公式	110
4.1.2	自再现模积分方程	111
4.2	对称共焦腔光场分布特性	114
4.2.1	方形镜共焦腔自再现模积分方程及其解	115
4.2.2	方形镜共焦腔自再现模的特征	116
4.2.3	方形镜共焦腔中的行波场	119
4.2.4	圆形镜共焦腔自再现模积分方程的解	120
4.2.5	圆形镜共焦腔自再现模的特征	121
4.2.6	圆形镜共焦腔的行波场	122
4.3	基模高斯光束的基本特点	123
4.3.1	高斯光束的振幅分布和光斑尺寸	123
4.3.2	高斯光束的相位分布	124
4.3.3	模体积	125
4.3.4	高斯光束的远场发散角	126
4.4	透镜对高斯光束的作用	126
4.4.1	薄透镜对高斯光束的变换	126
4.4.2	薄透镜对高斯光束 q 参数的变换	127
4.4.3	高斯光束的聚焦	129
4.4.4	高斯光束的准直	132
第5章	激光技术	135
5.1	光波的调制技术	135
5.1.1	激光调制的概念	135
5.1.2	激光调制方法	140

5.2	激光器选模技术	145
5.2.1	选模的基本概念	145
5.2.2	激光单横模的选取方法	146
5.2.3	激光单纵模的选取方法	149
5.3	激光器的稳频技术	152
5.3.1	影响频率稳定的因素	152
5.3.2	稳频方法	154
5.4	激光调Q技术	158
5.4.1	影响Q的因素及调Q原理	158
5.4.2	调Q方法	160
第6章	激光应用技术	165
6.1	激光应用技术的理论基础	165
6.1.1	激光与材料相互作用	165
6.1.2	激光的吸收过程	166
6.1.3	激光的热效应	168
6.1.4	等离子体产生过程	173
6.1.5	激光烧蚀过程	174
6.2	激光技术在材料加工领域的应用	175
6.2.1	激光熔覆技术	175
6.2.2	激光焊接技术	180
6.2.3	激光打孔技术	181
6.2.4	激光切割	182
6.2.5	激光快速成型	183
6.3	激光在军事领域的应用	184
6.3.1	激光测距	184
6.3.2	激光雷达、激光导航和激光制导	185
6.3.3	激光武器	189
6.4	激光技术在生物、医学领域的应用	190
6.4.1	激光在生物检测中的应用	190
6.4.2	激光在医疗中的应用	191
6.4.3	激光在医疗器械上的应用——激光刀	192
6.5	其他新型激光应用技术	193
6.5.1	激光输电技术	193
6.5.2	激光空间碎片处理技术	194
6.5.3	激光降雨技术	197

附录	199
附录 1 常用物理常数	199
附录 2 常见光学元件的光学变换矩阵	199
附录 3 常用激光晶体的典型技术参数	201
附录 4 典型气体激光器基本实验数据	201
附录 5 典型固体激光器工作物质参数	202
参考文献	203

第 1 章 激光产生的物理基础

1.1 光的本质及激光的发展

1.1.1 光的本质

激光是英文单词“Laser”的音译。在中国台湾和香港地区曾被译名为“镭射”，1964年，在钱学森院士的建议下，Laser被定名为“激光”或“激光器”。实际上，Laser是“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”的首字母缩写，直译过来即：受激辐射的光放大。因此，为了更好地理解和掌握激光器的工作过程、激光辐射的特点以及激光的应用，首先必须对光的本质有清晰的了解和认识。

关于光的本质，一直以来存在“光的微粒说”和“光的机械波动学说”两种观点。微粒说的观点是在公元前5~公元17世纪末、18世纪初，以牛顿(Isaac Newton, 1643~1727年)为代表的物理学家提出的，该学说认为：光是发光体发射出的微小粒子，遵从牛顿运动定律，因此光是沿着直线前进的。而波动学说是在17世纪末到19世纪上半叶期间，以惠更斯(Christiaan Huygens, 1629~1695年)为代表的物理学家提出的，该学说认为：光是一种在被称为“以太”(后来证明“以太”是不存在的)的弹性介质中传播的机械波。在19世纪初，托马斯·杨和菲涅尔等人对光的干涉、衍射、偏振等进行了一系列的广泛研究，从而推动了波动理论，使之得到广泛承认。1860年，麦克斯韦(James Clerk Maxwell, 1831~1879年)建立了电磁理论，确信光是一种电磁波，并且很好地解释了光的反射、折射、干涉、衍射、偏振以及双折射现象，至此，光的波动学说趋于完善。图1-1所示为电磁波谱图。

尽管波动理论被广泛接受，然而，到了20世纪初期，一些新的物理现象，比如黑体辐射、原子的线状光谱、光电效应、康普顿散射等现象却无法用经典的波动理论加以解释。为此，物理学家开始探索一种全新的理论来揭示这些现象的本质。

1900年，普朗克(Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858~1947年)提出了“量子假说”，认为能量的辐射不是连续的，而是处于某些分立的状态，最小单位为“量子”，其能量为 $\epsilon = h\nu$ ，并利用该假说成功地解释了黑体辐射的分布

规律，为量子理论的发展奠定了基础。

1905年，爱因斯坦（Albert Einstein，1879~1955年）继承并发展了普朗克的能量子假说，提出了“光子”理论，认为“光不仅是一种波动，而且还是一种粒子”，即光具有“波粒二象性”。爱因斯坦的光量子理论很好地解释了光电效应现象。

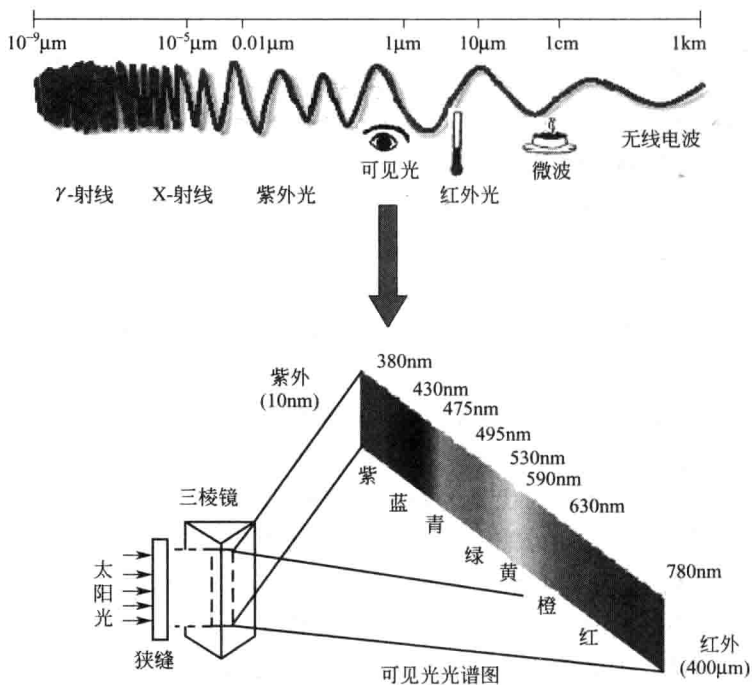


图 1-1 电磁波谱图

1.1.2 激光的发展简史

继爱因斯坦提出了光子理论之后，丹麦物理学家玻尔（Niels Henrik David Bohr，1885~1962年）于1913年建立了氢原子的量子理论，并且提出了“原子能级”的概念及跃迁理论，即原子或分子内的电子只能处于一系列不连续的能量状态，并把这些状态称之为能级。电子在能级间跃迁时，会发射或吸收一个光子，光子的频率为：

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

在玻尔的跃迁理论基础上，爱因斯坦于1916年提出：黑体辐射中，存在着原子的“受激辐射”的可能性。

爱因斯坦的受激辐射理论的提出，为激光的产生和发展提供了重要的物理基

础。1928年,拉登伯格从实验中观测到气体放电时由受激辐射造成的负色散效应,从而证实了爱因斯坦的预言。

1930年,量子力学重要成果之一是正确地描述了电磁辐射场与原子体系相互作用时可能发生的三种过程(自发辐射、受激辐射和受激吸收),并给出它们之间的定量关系。

1950年,普赛尔从试验上实现了粒子数反转分布,观察到了核自旋系统的反转分布。

1951年,法卜利坎特提出利用粒子数反转分布的物质实现放大电磁波的设计。

1951年,汤斯提出受激微波放大器(Maser)的概念。

1954年,汤斯和革登制成氨分子微波发射器,实现粒子数反转,研制成了“微波量子放大器”(Maser),形成一门新学科——量子电子学。

1958年,汤斯、肖洛提出将微波量子放大器的原理推广到光波段,设计了激光器。

1960年7月,美国休斯实验室(Hughes Research Labs)的梅曼(Maiman, 1927~2007年)在汤斯和肖洛的理论基础上发明了世界上第一台激光器——红宝石(Ruby)激光器。

激光是在有理论准备和生产实践迫切需要的背景下应运而生的,它一问世,就获得了异乎寻常的飞快发展。激光的发展不仅使古老的光学科学和光学技术获得了新生,而且导致整个一门新兴产业的出现。激光可使人们有效地利用前所未有的先进方法和手段,去获得空前的效益和成果,从而促进了生产力的发展。

继梅曼于1960年发明第一台红宝石激光器之后,1961年2月,贝尔实验室研制成了He-Ne混合气体激光器。1961年有人提出调Q技术,并于1962年研制成第一台调Q激光器。1962年,美国宣布研制成功第一台砷化镓(GaAs)半导体激光器。1963年,兰姆建立了激光的半经典理论。对激光的频率特性和功率特性进行了比较完善的探讨。1965年,实现了铈酸锂光学参量振荡器,借助半经典理论预言了锁模效应的存在,并于1966年研制成固体锁模激光器,激光器获得超短脉冲;1970年,研制成了准分子激光器;1977年,研制成了红外波段的自由电子激光器;1984年,研制出光孤子激光器。随着激光技术及激光器件的发展,近20年来,形成一系列新的交叉学科和应用领域,例如信息光电子技术、激光医疗与光子生物学、激光(微)加工、激光检测与计量、激光全息技术、激光光谱分析技术、非线性光学、超快光子学、激光化学、量子光学、激光雷达、激光制导、激光分离同位素、激光可控核聚变和激光武器等。

1.2 产生激光的能级理论

1.2.1 原子能级和简并度

物质是由离子、原子或分子组成的。根据卢瑟福的原子核模型，原子是由带正电的原子核和核外电子组成，原子核带正电，核外电子带等量负电。核外电子在绕原子核做轨道运动的同时，本身也在做自旋运动。由原子物理学可知，原子中电子的运动状态由以下四个量子数来确定。

(1) 主量子数 n $n=1,2,3,\dots$ ，主量子数大体上决定了原子中电子的能量值。不同的主量子数代表电子在不同的壳层上运动。

(2) 辅量子数 l $l=0,1,2,\dots,n-1$ ，共有 n 个取值，辅量子数决定了电子在不同轨道上运动的轨道角动量。 $l=0,1,2,3$ 等的电子，依次用字母表示为 s, p, d, f ，习惯上又称之为 s 电子， p 电子， \dots 。

(3) 磁量子数 m_l $m_l=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ ，共有 $2l+1$ 个取值。磁量子数决定了轨道角动量在外磁场方向上的分量。

(4) 自旋磁量子数 m_s m_s 取 $\pm 1/2$ 两个值，它决定了自旋角动量在外磁场方向上的分量。

每一组 (n, l, m_l, m_s) 组合代表了电子的一种运动状态，电子具有的量子数不同，表示其运动状态也不同。按照量子力学理论，电子在原子系统中运动

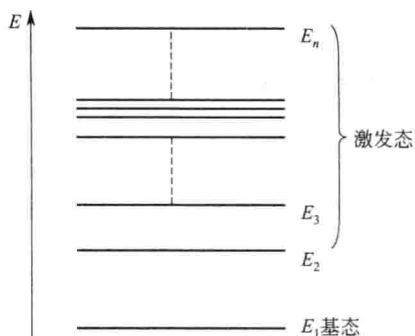


图 1-2 原子能级示意图

时，可以处在一系列不同的壳层或轨道状态，这些运动状态是分立的，每一个分立状态都对应一个能量值，因此，这些分立状态相应有一系列分立的、不连续的能量值，这些能量值通常被称为电子（或原子系统）的能级，依次用 E_1, E_2, \dots, E_n 表示，能级结构简图如图 1-2 所示。

能量最低的能级状态称为基态，处于该状态的电子最稳定。能量高于基态的其他能级状态称为激发态。一般而言，处于一定电子态的原子对应某一确定的能级。

然而，在同一主量子数 n 下，如 l, m_l, m_s 可取不同的值，将会对应不同的量子态（即电子态或电子运动状态），因此，某一能级不一定只对应一个电子态，通常情况下，会有若干个不同的电子运动状态具有同一能级。如果有两个或两个以上的不同运动状态的电子具有相同的能级，就把这样的能级称为简并能级。相应地，同一能级对应的不同电子态的数目，称为简并度，用字母 g 表示。

1.2.2 单个原子的原子态及能级结构

如前所述, 氢原子及类氢原子核外只有一个电子, 因此其电子态就可以代表原子态。然而, 对于核外有多个电子的原子, 其原子态如何表示呢? 根据原子物理可知, 对多电子原子态的标记基于原子的电子组态符号。因此, 本节先介绍原子的电子组态符号, 然后再介绍多电子原子的原子态标记方法。

1.2.2.1 电子组态符号

电子组态符号简称为电子态, 即将原子中各个电子所处的电子态一起标出的符号。为了将各个电子所处的电子态标识出来, 首先要清楚多电子原子中, 电子在原子壳层中的填充原则。按照泡利不相容原理, 在多电子原子中, 不可能有两个或两个以上电子具有完全相同的量子态, 也就是说, 如果有两个电子处于相同的 n, l, m_l 的量子状态下, 那么这样的两个电子一定要具有不同的 m_s , 即一个是正自旋 ($m_s=1/2$), 另一个必定是负自旋状态 ($m_s=-1/2$), 从而使得这两个电子具有不同的量子态。另外, 电子在填充原子壳层时, 遵守能量最低原理, 即一般情况下 (无外界激发), 电子总是优先充满能量最低的能级, 然后再依次填充能量较高的能级, 每个能级上所能容纳的最多电子数为 $2n^2$ 个。以钙原子为例, 其电子组态一般标示如下: Ca 原子有 20 个核外电子, 其基态下的电子组态即可表示为 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$ (因为它 M 层上只有 s 和 p 两个能级, 因此, 次外层只有 8 个电子)。基态原子的电子吸收能量后, 电子会跃迁到较高能级, 此时原子被激发, 变成激发态原子。原子在被激发过程中, 往往是外层的价电子被激发到外层轨道, 激发程度不同, 价电子可跃迁到 ns, np, nd, nf, \dots 等轨道上。

1.2.2.2 多电子原子的原子态标记

在具有多个价电子的原子系统中, 电子既具有轨道角动量也具有自旋角动量, 二者之间的相互作用往往会使得原子的同一电子组态具有不同的能量, 从而具有不同的原子状态。因此, 对多电子的原子还需标记不同的原子态。由于原子中的电子的轨道运动和自旋运动均会产生磁场, 因此, 多个电子轨道运动与自旋运动之间或者轨道运动与轨道运动、自旋运动与自旋运动之间会产生相互作用, 这种相互作用通常称为耦合作用, 轨道运动与自旋运动之间的耦合作用有两种方式: LS 耦合和 JJ 耦合。耦合作用的存在, 使得不同的原子态有不同的能量。因此, 在标记原子态时必须考虑这种耦合作用。在多数情况下, 对非等效电子只要按 LS 耦合计算, 就可得到正确的原子态。一般采用光谱项符号 $n^{2S+1}L_J$ 来标记原子 (或能级) 状态。其中, n 是主量子数, S 是自旋角动量量子数, $2S+1$ 为光谱项的多重项, 也可表示为 M ; L 是角量子数, 可用大写字母 S, P, D, F, G... 表示; J 是总量子数。当 $L > S$ 时, 由 L 和 S 确定的每

一个光谱项，将会有 $2S+1$ 个具有不同 J 值的光谱支项。由于 J 值不同的支项，其能量差别极小，所以由它们产生的光谱线，波长极为接近，称为多重线系。把原子中所有可能存在的状态的光谱项，用图解的形式表示即为原子能级图。氦原子

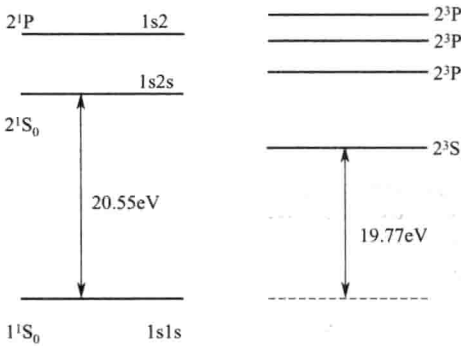


图 1-3 氦原子的部分能级示意图

是多电子原子中电子结构较为简单的一类原子，下面就以氦原子为例，标识其原子态并给出其能级示意图。氦原子的基态电子组态为 $1s1s$ ，因此对应的原子态为 1^1S_0 ， $2S+1=1$ ，所以属于氦原子的单重项。如果一个 $1s$ 电子被激发到 $2s$ 能级上，该激发态的氦原子的电子组态为 $1s2s$ ，对应的原子组态为 2^3S_1 （表示激发电子的主量子数为 2，且 $2S+1=3$ ，属于氦原子的三重项）或者 2^1S_0 （表示激发态主

量子数为 2，且 $2S+1=1$ ，属于氦原子的单重项）。部分氦原子的能级示意图如图 1-3 所示。

1.2.3 能级跃迁理论

1.2.3.1 能级跃迁理论

根据能量最低原理可知，能级越低的状态越稳定，因此，处于高能级上的原子总是力图回到能级较低的状态，反之，处于低能级上的原子如果吸收足够的能量，也将被激发到高能级状态从而成为激发态原子。这样的过程称之为能级跃迁。在能级跃迁过程中，总是伴有能量的吸收或释放过程，根据吸收或释放能量方式的不同，跃迁可分为辐射跃迁和非辐射跃迁两种。如果因发射或吸收光子从而使原子造成能级跃迁，这种跃迁就称为辐射跃迁。辐射跃迁包括自发辐射、受激辐射和受激吸收三个过程，这三种辐射跃迁与激光的产生过程密切相关，具体内容将在第 2 章中详细介绍。当然，并不是任意两个能级之间都能发生辐射跃迁。能级之间要想发生辐射跃迁，必须满足辐射跃迁的选择定则，根据原子物理知识，选择定则包括以下两点基本原则。

① 奇偶态原则 辐射跃迁必须改变奇偶态，也就是说发射或者吸收光子的过程只能发生在一个偶态能级与另一个奇态能级之间，两个偶态能级之间或两个奇态能级之间不可能发生辐射跃迁。

② 电偶极跃迁规则 发生辐射跃迁时，两个能级之间角动量量子数改变量只能取 0 或 ± 1 ，从一个 $J=0$ 能级到另一个 $J=0$ 的能级跃迁除外，即 $\Delta J=0, \pm 1$ ($J=0 \rightarrow J=0$ 除外)。

对于采用 LS 耦合的原子，在满足上述两条定则的同时，还需要满足下列两条选择定则。

① 轨道量子数规则 能级之间发生辐射跃迁时，轨道量子数改变量只能取 0 或 ± 1 ，从一个 $L=0$ 能级到另一个 $L=0$ 的能级跃迁除外，即 $\Delta L=0, \pm 1$ ($L=0 \rightarrow L=0$ 除外)。

② 自旋量子数规则 能级之间辐射跃迁时，自旋量子数不能发生改变，即 $\Delta S=0$ 。

而非辐射跃迁是指在不同能级之间跃迁时，不伴随光子的吸收或发射的过程，而是吸收其他原子的能量或者把多余的能量传递给其他原子，这种跃迁不受选择定则的限制。一般而言，气体激光器中，放电气体在非辐射跃迁过程中，能量转移是通过原子与其他原子或自由电子的碰撞或者原子与毛细管壁的碰撞来实现的。而固体激光器中，非辐射跃迁的能量转移是通过激活离子与基质点阵晶格之间的相互作用，把激活离子的能量转移给晶格点阵，引起晶格点阵的热振动，或者将晶格的点阵能转移给激活离子。

1.2.3.2 典型激光器能级结构和特点

激光器中的工作物质不同，对应的能级结构也不一样。一般而言，常见的典型激光器能级结构分为两类：三能级系统和四能级系统。三能级系统的结构简图如图 1-4 所示。工作物质原子有三个能级， E_1 为基态能级， E_2 和 E_3 为激发态能级，其中 E_3 能级通常又称为泵浦能级或抽运能级，该能级为非稳能级，泵浦到该能级上的原子以无辐射跃迁方式快速回落到亚稳态能级 E_2 上。从而在 E_2 和 E_1 能级之间建立起粒子数反转分布。随后， E_2 能级上的原子会以受激辐射的跃迁方式回落到基态能级 E_1 上。因此， E_2 能级通常也被称为激光上能级。世界上第一台红宝石激光器属于三能级结构。三能级系统激光器工作物质的激光上、下能级是建立在高能级 E_2 和基态能级 E_1 之间，因此，通常需要很高的抽运功率以

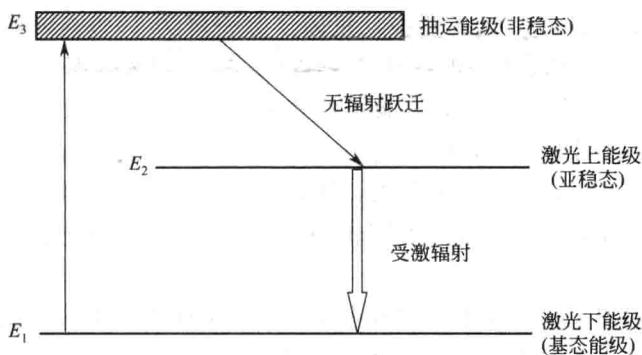


图 1-4 三能级系统结构简图

实现粒子数反转分布。

图 1-5 为四能级系统激光器的能级结构简图。 E_1 能级为基态能级, E_4 能级为抽运能级 (该能级寿命很短, 为非稳能级), 抽运到该能级上的原子以无辐射跃迁的方式迅速回落到 E_3 能级 (该能级为亚稳能级, 能级寿命相对较长), 该能级上的原子以受激辐射的方式回落到 E_2 能级上, 从而辐射出激光。 E_3 能级称为激光上能级, E_2 能级为激光下能级。因此, 四能级系统的激光上、下能级是建立在两个高能级之间。一般情况下, 高能级上基本处于全空状态, 因此, 在激光上、下能级之间很容易建立起粒子数反转分布, 激光阈值很小。常见的四能级系统激光器有 Nd:YAG 激光器、Nd 玻璃激光器、He-Ne 激光器等。

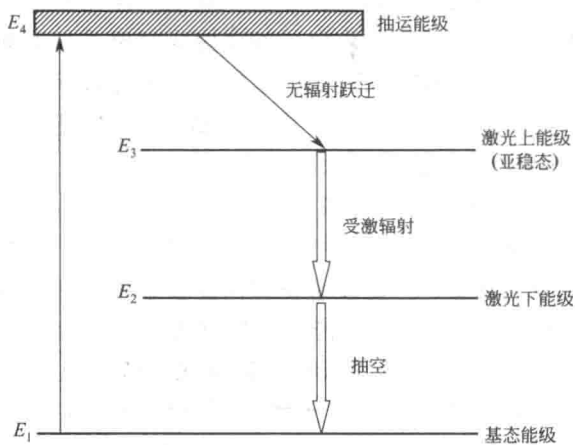


图 1-5 四能级系统结构简图

1.2.4 多原子系统的粒子分布

实际上, 在激光器工作物质内, 有大量具有如图 1-2 所示的相同能级结构的原子存在。例如, He-Ne 激光器中, 氖原子数密度为 $10^{10} \sim 10^{15}$ 个/ cm^3 , 红宝石激光器中 Cr^{3+} 数密度为 $10^{18} \sim 10^{20}$ 个/ cm^3 。在大量相同原子 (分子或离子) 组成的系统中, 尽管每个原子的能级结构相同, 但是, 由于热运动以及原子 (分子或离子) 之间的碰撞, 所有的原子不可能都处于基态, 总会有一些原子 (分子或离子) 被激发到高能级上去, 从而导致激光器工作物质中的原子在各个能级上有一定的分布规律。不同的状态下, 各个能级上的原子数分布也不同。

在热平衡状态下, 大量原子的分布规律遵从统计规律性, 并服从玻尔兹曼分布定律。根据玻尔兹曼分布定律, 可得到 E_m 和 E_n 能级, 两个能级上的原子数之比满足如下关系: