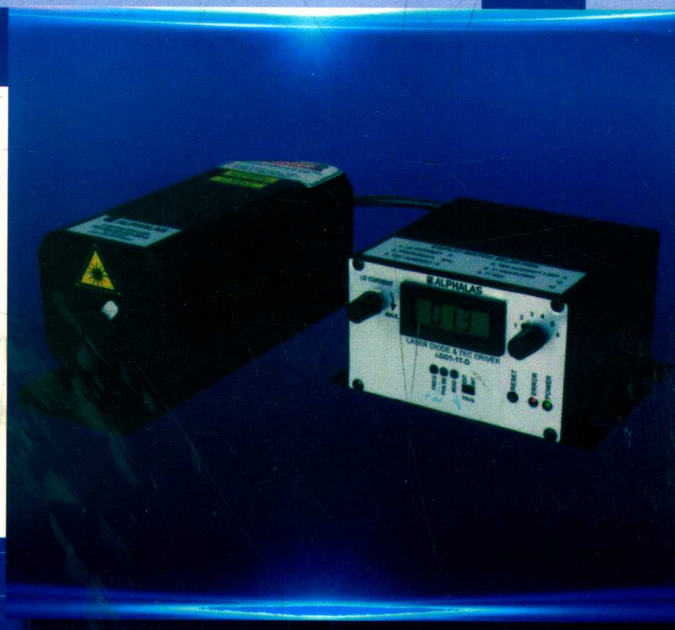


DAGONGLÜ GUTI JIGUANGQI DE FAZHAN JI YINGYONG

大功率固体激光器的 发展及应用

王红英 著



电子科技大学出版社

University of Electronic Science and Technology of China Press

陕西省自然科学基金项目资助 (No.2016JM6036)

由西安文理学院学术专著出版基金资助

大功率固体激光器的 发展及应用

王红英 著



图书在版编目(CIP)数据

大功率固体激光器的发展及应用/王红英著. -- 成都: 电子科技大学出版社, 2017.11
ISBN 978-7-5647-5260-6

I.①大… II.①王… III.①大功率—固体激光器
IV.①TN248.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第274609号

大功率固体激光器的发展及应用

王红英 著

策划编辑 李述娜

责任编辑 谭炜麟

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段159号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 北京一鑫印务有限责任公司

成品尺寸 185mm × 260mm

印 张 21.25

字 数 500千字

版 次 2018年5月第一版

印 次 2018年5月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-5260-6

定 价 74.00元

版权所有，侵权必究

简介

激光器本质上是将其他能量转换为激光的器件。其有多种分类方式，按工作介质可分为：固体激光器、气体及蒸汽激光器、液体激光器、自由电子激光器等，一些新型独立命名的激光器，如光纤激光器、半导体激光器等都可归于固体激光器，而 HF/DF 化学激光器、碱金属激光器等都可归于气体及蒸汽激光器。按泵浦 / 激励方式的不同可分为光泵浦、电激励激光器（电泵浦）、燃烧驱动激光器（热泵浦）、化学激光器（化学反应泵浦）等，在一些激光器中采用组合泵浦方式；按运转方式又可分为连续波激光器和脉冲激光器。本书所研究的大功率固体激光器则属于当前固体激光器的研究前沿领域。

大功率固体激光器在军事、加工、医疗和科学研究领域有广泛的用途。它常用于测距、跟踪、制导、打孔、切割和焊接、半导体材料退火、电子器件微加工、大气检测、光谱研究、外科和眼科手术、等离子体诊断、脉冲全息照相以及激光核聚变等方面。另外，大功率固体激光器还用作可调谐染料激光器的激励源。本研究对大功率固体激光器的研究则结合了大量理论分析与示例研究，从基频激光技术、倍频激光技术、和频激光技术三大技术方向入手，对未来科技中大功率固体激光器的应用进行了分析与展望。因研究历时漫长，书中难免有所疏漏，希望阅读此书的读者朋友们不吝赐教，大家共同进步，为我国的科技发展，尤其激光方向的发展贡献自己的力量，也希望本研究能够帮助到阅读此书的朋友们。

目 录

第一章 绪 论 / 001

第一节 激光产生的机理分析 / 002

- 一、跃迁和辐射 / 002
- 二、激光器的基本构成 / 004
- 三、激活粒子的能级系统 / 005
- 四、速率方程 / 007

第二节 激光的特性与类型综述 / 009

- 一、激光的特性 / 009
- 二、激光器的类型 / 011

第二章 固体激光器导论 / 014

第一节 固体激光器的起源和发展背景 / 014

第二节 固体激光器的主要特点 / 019

- 一、概 述 / 019
- 二、全固态激光器的分类 / 019
- 三、全固态激光器的应用 / 033

第三节 固体激光器及其变频技术的发展现状 / 034

- 一、国际动态 / 034
- 二、国内动态 / 044
- 三、目前存在的问题和发展方向 / 051

第三章 全固态激光技术基础理论研究 / 058

第一节 全固态激光技术基础理论 / 058

- 一、增益介质 / 058

二、泵浦系统 / 077

三、激光腔结构 / 080

四、激光调制技术 / 082

五、激光锁模技术 / 092

六、激光稳频技术 / 093

第二节 全固态激光变频技术理论 / 093

一、倍频技术 / 095

二、光学混频技术 / 098

三、光学参量放大技术 / 099

四、光学参量振荡技术 / 099

五、几种典型的非线性光学晶体 / 100

第四章 高功率全固态基频激光技术研究 / 106

第一节 大功率固体激光器光束质量控制技术研究 / 106

一、光束质量的评定标准和制约因素 / 106

二、热效应基本理论 / 108

三、热透镜焦距的测量和热近非稳谐振腔的设计 / 110

四、热致双折射效应的补偿 / 114

第二节 大功率连续波基频固体激光器实验研究 / 115

第三节 大功率准连续基频固体激光器实验研究 / 117

第五章 大功率固体倍频激光技术研究 / 122

第一节 大功率固体 532nm 激光器研究进展及其应用 / 122

一、全固态绿光激光器发展背景 / 122

二、全固态绿光激光器的研究现状 / 124

三、全固态绿光激光器的应用 / 130

第二节 大功率固体激光器倍频基本理论 / 132

一、倍频过程的数理模型 / 132

二、腔外倍频理论分析 / 133

三、腔内倍频理论分析 / 135

第三节 腔外倍频 DPL 实验研究 / 136

一、振荡器腔外倍频实验研究 / 137

二、MOPA 系统腔外倍频实验研究 / 139

第四节 腔内倍频 DPL 实验研究 / 141

一、Z-型腔腔内倍频实验研究 / 141

二、L-型腔腔内倍频实验研究	/ 143
第五节 百瓦级绿光 DPL 样机的研制和应用	/ 147
一、用 I 类匹配 $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ (CLBO) 晶体作为非线性晶体, 开展四倍频实验研究	/ 147
二、用该样机输出的绿光作为泵源, 开展 OPO 实验研究	/ 147
三、用该样机输出的绿光作为泵源, 开展钛宝石 (Ti:S) 激光器的实验研究	/ 148
第六章 高功率全固态和频激光技术研究	/ 150
第一节 大功率固体 589nm 激光器研究进展及其应用	/ 150
一、直接发射黄光激光的固体材料	/ 150
二、红外波长直接倍频的黄光激光器	/ 151
三、受激拉曼散射 (SRS) 效应产生的黄光激光	/ 151
四、双波长和频产生黄光激光	/ 151
第二节 固体激光器和频过程理论分析	/ 156
一、Nd:YAG 激光器和频产生黄光的原理	/ 156
二、非线性和频晶体特性比较	/ 157
第三节 腔内和频固体激光器实验研究	/ 158
一、V-型腔腔内合频实验研究	/ 158
二、L-型腔腔内和频实验研究	/ 162
第四节 589nm 激光检波装置研制与实验应用	/ 168
第七章 高功率激光装置参数测量系统智能故障诊断技术研究	/ 171
第一节 引 论	/ 171
一、大功率固体激光器故障诊断技术的发展及研究现状	/ 171
二、智能故障诊断方法的研究和应用	/ 172
三、大功率固体激光器参数测量电控系统智能故障诊断的功能分析	/ 175
第二节 智能故障诊断系统结构及相关理论方法研究	/ 177
一、大功率固体激光器参数测量电控系统的基本组成及故障机理	/ 177
二、智能故障诊断系统的结构	/ 181
三、各子系统的设计	/ 182
四、相关理论方法概述	/ 183
第三节 基于粗糙集理论的故障诊断规则获取研究	/ 184
一、粗糙集理论	/ 184
二、知识约简	/ 187
三、决策信息表建立、约简及规则获取	/ 188
四、大功率固体激光器参数测量电控系统主放电源管理箱故障知识规则获取应用实例	/ 189

第四节	RBF 云神经网络及其在故障诊断中的应用	/	191
一、	RBF 神经网络	/	191
二、	云理论的基本知识	/	192
三、	RBF 云神经网络	/	195
四、	仿真工具 MATLAB7.1 介绍	/	196
五、	RBF 云神经网络在大功率固体激光器参数测量电控系统故障诊断中的应用	/	196
第五节	基于 RBF 云神经网络和专家系统的智能故障诊断研究	/	198
一、	神经网络和专家系统相互协调工作的结构及故障诊断原理	/	198
二、	面向对象的知识表示方法	/	199
三、	RBR 的理论与技术	/	201
四、	CBR 的理论与技术	/	204
五、	CBR 推理与 RBR 推理的融合	/	208
六、	RBF 云神经网络、RBR 及 CBR 相互协调的故障诊断	/	212
第六节	大功率固体激光器参数测量电控系统故障维修决策研究	/	214
一、	RCM 维修决策方法	/	214
二、	RCM 的基本问题及一般步骤	/	214
三、	主放参数测量组件的 RCM 分析	/	216
四、	维修方式决策	/	218
五、	维修周期决策	/	223
七、	维修决策的评价 - 模糊综合评价理论	/	225
第七节	大功率固体激光器参数测量电控系统智能故障诊断的实现	/	226
一、	系统的开发平台选择	/	226
二、	系统的开发环境硬件:	/	227
三、	智能诊断系统的总体设计	/	228
四、	智能诊断系统的设计及实现	/	229
第八章	基于大功率固体激光器的高能激光武器研究与相关法规综述	/	238
第一节	基于大功率固体激光器的高能激光武器研究	/	238
一、	概述	/	238
二、	自适应光学系统简介	/	239
三、	美国反核导弹激光武器的早期发展	/	241
四、	基于大功率固体激光器的反卫星高能激光武器	/	243
五、	基于大功率固体激光器的激光人造星技术	/	246
六、	美国高能激光武器发展现状	/	251
七、	德国激光武器研制状况	/	260

八、第三代高能“液体”激光器简述	/ 265
第二节 激光武器产生的影响和国际法	/ 270
一、激光武器产生的影响	/ 270
二、国际法	/ 275
第九章 大功率固体激光器的优化与设计	/ 281
第一节 引 论	/ 281
一、研究意义	/ 281
二、国内外研究情况概述	/ 281
三、本章主要研究方向	/ 285
第二节 固体激光器重要部件的优化	/ 286
一、氙灯	/ 286
二、有关 Nd:YAG 激光棒	/ 289
三、聚光腔的设计	/ 292
第三节 谐振腔内光强分布的仿真	/ 295
一、传输矩阵理论	/ 295
二、光强仿真系统创建	/ 298
第四节 激光介质热效应的有限元分析	/ 303
一、温度场问题的描述与求解	/ 303
二、激光棒内热分布仿真系统的创建	/ 306
结语——兼论大功率固体激光器的冷却技术	/ 310
一、大功率固体激光器冷却技术简介	/ 312
二、雾化喷射冷却国内外研究进展	/ 315
三、现有研究工作的不足	/ 326
参考文献	/ 327

第一章 绪 论

激光 (Laser), 原意是受激辐射放大所产生的光, 是英文 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的缩写。激光科学从孕育到初创和发展, 凝聚了众多科学家的创造智慧, 其中美国物理学家汤斯 (Charles Hard Townes) 和肖洛 (Arthur L.Schawlow) 所做的开创性工作尤为突出。他们在量子电子学领域中进行的基础研究, 推动了微波激励器和激光器的发明。

推动激光发明的理论基础可以追溯到 1916 年爱因斯坦 (Albert Einstein) 提出的光子受激辐射的概念, 但是, 当时科学技术和生产发展还没有提出对激光的实际需要。直到 20 世纪 50 年代初, 电子学、微波技术的应用迫切需要强相干光源, 才促使人们开始向激光进军。1951 年, 汤斯提出了微波激励器 (Microwav Amplification by Stimulated Emission of Radiation, MASER) 的概念。经过几年的努力, 1954 年, 美国贝尔实验室的汤斯和苏联的普罗霍罗夫 (Aleksandr Mikhailovich Prokhorov)、巴索夫 (Nicolay Gennadiyevich Basov) 分别使氨分子束实现了粒子数反转, 从而观察到微波的受激发射, 这为以后激光器的诞生奠定了基础。当时, 汤斯希望微波激励器能产生波长为 0.5mm 的微波, 遗憾的是, 激励器输出波长却为 1.25cm 的微波。微波激励器问世以后, 科学家希望能制造输出更短波长的激励器。汤斯认为可将微波准到红外区附近, 甚至到可见光波段。

1956 年, 布隆伯根 (Nicolaas Bloem bergen) 提出利用光泵浦三能级原子系统实现粒子束反转分布的新构思。

1958 年, 贝尔实验室的科学家肖洛与汤斯合作提出了利用法布里 - 珀罗干涉仪作为腔体实现光的受激发射的激光器的设想, 发表了在可见光频段工作的激励器的设计方案和理论计算, 首次描述了以光学频率产生激光作用的条件, 提出了利用尺度远大于波长的开放式光谱谐振腔实现激光器的新思路, 为激光器的发明奠定了基础。同年, 苏联莫斯科的普罗霍洛夫 (A.M.Prokhorov) 和巴索夫 (A.M.Prokhorov) 几乎同时在量子电子学的基础研究中, 根据微波激励器和激光器原理研制了振荡器和放大器。这又将激光研究推上了一个新阶段。以上工作导致了激光器的发明。

世界上第一台激光器是美国人梅曼 (T.H.Maiman) (图 1-1) 于 1960 年 5 月 15 日在加州休斯实验室制成的红宝石激光器, 它是三能级系统, 用红宝石晶体做发光材料, 用发光度很高的脉冲氙灯做激发光源, 获得了人类有史以来的第一束激光, 波长为 694.3nm, 实现

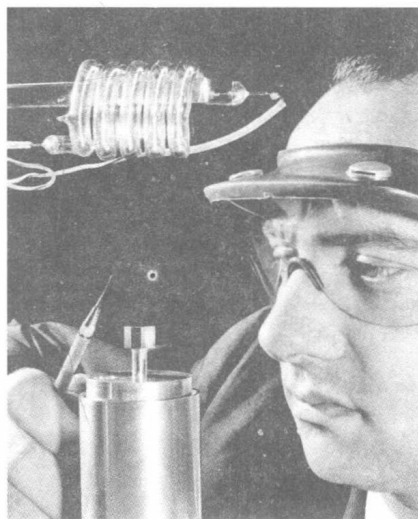


图 1-1 梅曼 (T.R Maiman)

了汤斯和肖洛在 1958 年的预言。

1965 年, 第一台可产生大功率激光的器件——二氧化碳激光器诞生。1967 年, 第一台 X 射线激光器研制成功。几十年间, 人们制造了输出各种不同波长的激光器, 从中红外到深紫外, 甚至是可调谐激光器。大功率激光器的研制成功, 又开拓了新的领域。现在, 激光应用已经遍及光学、医学、原子能、天文、地理、海洋、军事等领域, 它标志着新技术革命的发展。在我国, 1961 年 9 月, 中国科学院长春光学精密机械研究所研制成功国内第一台激光器。此后, 在激光器的研制、激光技术的应用以及激光理论方面都取得了巨大进展, 并带动了一些新型学科的发展, 如全息光学、傅里叶光学、非线性光学、光化学等, 激光还与当今的重点产业——信息产业密切相关。

第一节 激光产生的机理分析

1900 年, 普朗克用辐射量子化假设成功地解释了黑体辐射规律; 1913 年, 玻耳提出了原子中的电子运动状态的量子化假设并解释了氢原子光谱规律。在此基础上, 爱因斯坦提出了光量子概念, 他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。1916 年, 爱因斯坦在《关于辐射的量子力学》一文预言了原子受激辐射发光的可能性, 即存在激光的可能性。40 年后, 受激辐射概念在激光技术中得到了应用。

一、跃迁和辐射

(一) 受激吸收和自发辐射

普通常见光源的发光(如电灯、火焰、太阳等发光)是由于物质在受到外来能量(如光能、电能、热能等)作用时, 原子中的电子吸收外来能量而从低能级跃迁到高能级, 即原子被激发。激发的过程是一个“受激吸收”过程。如图 1-2 所示, 处在高能级(E_2)的电子寿命很短(一般为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ s), 在没有外界作用下会自发地向低能级(E_1)跃迁, 跃迁时将产生光(电磁波)辐射。辐射光子能量为

$$h\nu = E_2 - E_1$$

这种辐射称为自发辐射。

原子的自发辐射过程完全是一种随机过程, 各发光原子的发光过程各自独立, 互不关联, 即所辐射的光在发射方向上是无规则地射向四面八方, 另外初始位相、偏振状态也各不相同。由于激发能级有一个宽度, 所以发射光的频率也不是单一的, 有一定的宽度。

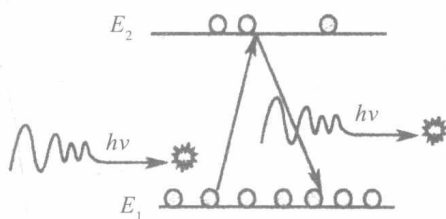


图 1-2 受激吸收和自发辐射

在通常热平衡条件下,处于高能级 E_2 上的原子数密度 N_2 , 远比处于低能级的原子数密度 N_1 低。这是因为处于能级 E 的原子数密度 N 的大小是随能级 E 的增加而指数减小, 即 $N \propto \exp(-E/kT)$ 。这是著名的波耳兹曼分布规律。于是, 当大量近似的原子在温度 T 处于热平衡状态时, 任何两个能级 N_1 和 N_2 的相关粒子数满足

$$\frac{N_2}{N_1} \propto \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right)$$

式中, N_1 和 N_2 分别为处于能级 E_1 和 E_2 的原子数; k 为波耳兹曼常量。因为 $E_2 > E_1$, 所以 N_2/N_1 总小于 1。在绝对零度时, 波耳兹曼统计认为所有的原子都处于基态。例如, 已知氢原子基态能量为 $E_1 = -13.6\text{eV}$, 第一激发态能量为 $E_2 = -3.4\text{eV}$, 在 20°C 时, $kT \approx 0.025\text{eV}$, 则

$$\frac{N_2}{N_1} \propto \exp(-400) \approx 0$$

可见, 即使在 20°C 时, 全部氢原子几乎都处于基态, 要使原子发光, 外界必须提供能量使原子到达激发态, 所以普通广义的发光是包含了受激吸收和自发辐射两个过程。一般说来, 这种光源所辐射的光能量较弱, 加上向四面八方发射, 会使能量更加分散。

(二) 受激辐射和光的放大

由量子理论可知, 一个能级对应电子的一个能量状态, 电子能量由主量子数 n ($n=1, 2, \dots$) 决定。在描写原子中电子运动状态时, 除能量外, 还有轨道角动量 L 和自旋角动量, 它们都是量子化的, 由相应的量子数来描述。

量子理论告诉我们, 对应同一主量子数 n , 角动量量子数 l 有 n 种取值, 这种现象称为简并。当电子从高能级向低能级 (两个能级对应两主量子数 n) 跃迁时, 只能发生在角动量量子数 l 相差 ± 1 的两个状态之间, 这就是一种选择规则。如果选择规则不满足, 则跃迁的概率很小, 甚至接近零。在原子中可能存在这样一些能级, 一旦电子被激发到这种能级上时, 由于不满足跃迁的选择规则, 可使它在这种能级上的寿命很长, 不易发生自发辐射跃迁到低能级上。这种能级称为亚稳态能级。但是, 在外来光的诱发和刺激下可以使其迅速跃迁到低能级, 并放出光子。这种过程是被“激”出来的, 故称受激辐射。

受激辐射的概念是爱因斯坦于 1917 年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。如图 1-3 所示, 受激辐射的过程大致如下: 原子开始处于高能级 E_2 , 当一个外来光子所带的能量 $h\nu$ 正好为某一对能级

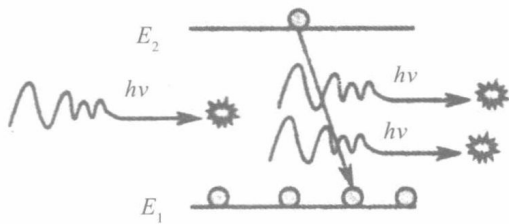


图 1-3 受激吸收和受激辐射

之差 E_2-E_1 ，则这原子可以在此外来光子的诱发下从高能级 E_2 向低能级 E_1 跃迁。这种受激辐射的光子有显著特点，就是原子可发出与诱发光子相同的光子，不仅频率（能量）相同，而且发射方向、偏振方向以及光波的相位都完全一样。于是，入射一个光子，就会出射两个完全相同的光子，这两个光子又可以去诱发其他发光粒子，产生更多状态相同的光子。当存在谐振腔时时，受激辐射所产生的光子在增益介质中继续诱发受激辐射，使得受激辐射光不断增强，这种现象称为受激辐射光放大，这种在受激过程中产生并被放大的光就是激光。综上所述，受激辐射是产生激光的基础。

（三）粒子数反转

一个诱发光子不仅能引起受激辐射，而且能引起受激吸收。前者使得光子数增加，后者使得光子数减少。当一束光通过发光介质后，光强究竟是增强还是减弱，要看这两种跃迁过程哪个占优势。如前所述，在热平衡条件下，各能级上的粒子数分布服从波尔兹曼分布，如图 1-4 所示， $E_2 > E_1$ ，在热平衡状态上，上能级的粒子数比下能级少很多，即 $N_2 < N_1$ ，原子几乎都处于最低能级（基态）。光通过这种介质时，光的吸收总是大于光的受激辐射。因此，通常情况下，物质只吸收光子，只有当处在高能级的原子数目比处在低能级的原子数目还多时，受激辐射跃迁才能超过受激吸收跃迁。由此可知，为使光源发射激光而不是发出普通光的关键是，介质中原子处在高能级的数目大于处在低能级上的数目，即 $N_2 > N_1$ ，这种情况称为粒子数反转。因此，如何从技术上实现粒子数反转则是产生激光的必要条件。

为了形成粒子数反转，需要对增益介质输入能量，这一过程称为泵浦（也称为激励或者抽运）。粒子数反转形成的过程不但要借助于光子能量较高的光源进行泵浦，而且要求参与激光工作的能级超过两个，必须通过泵浦将粒子激发到高于激光工作上能级的某个能级。换言之，激光光子的波长比泵浦光子的波长更长。激光的特点实际上也是展示不同阈值的过程，当在阈值功率以下进行泵浦时，输出的是非相干的自发辐射；当高于阈值功率进行泵浦时，则产生频谱较窄的激光输出。

二、激光器的基本构成

激光产生的条件可归纳为形成粒子数反转、提供光反馈、满足激光振荡的阈值条件。因而，激光器的组成通常由工作介质、谐振腔和激励系统三部分组成，如图 1-5 所示。

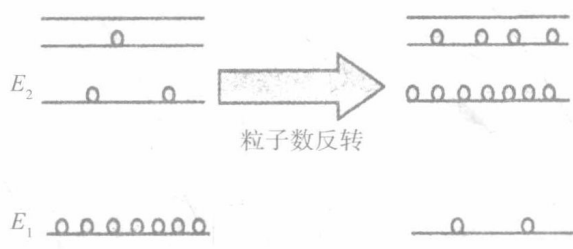


图 1-4 粒子数反转

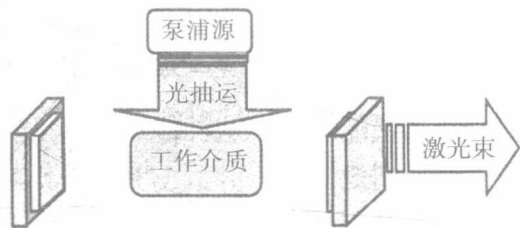


图 1-5 激光器的基本结构

(一) 工作介质

是激光器的核心, 只有能够实现能级跃迁的物质才能作为激光器的工作介质。在外来能量的激发下, 激光工作介质中上能级 E_2 和下能级 E_1 之间形成粒子数反转分布, 即 $N_2 > N_1$, 这样的工作介质称为激活介质。目前, 激光工作介质已有数千种, 激光波长已由 X 光远至红外光。例如氦氖激光器中, 通过氦原子的协助, 使氖原子的两个能级实现粒子数反转。

(二) 谐振腔

谐振腔是激光器的重要部件, 其作用一是延长工作介质的长度, 使工作介质的受激辐射连续进行, 从而不断给光子加速; 二是限制激光输出的方向; 三是选定激光输出波长。最简单的光学谐振腔是由放置在激光器两端的两个相互平行的反射镜组成。当工作介质中的原子在实现了粒子数反转的两能级间发生跃迁时, 辐射出的光子方向是任意的, 只有平行于激光器轴线的光才能在激活介质内往复反射, 这些光子将在两反射镜之间往复反射, 于是不断地引起受激辐射, 很快就产生出相当强的激光。而在其他方向的光很快逸出谐振腔。这两个互相平行的反射镜, 一个为全反射镜 (对于某个或某些特定波长的反射率接近 100%), 另一个为部分反射镜, 对于特定波长的反射率通常为 70% ~ 98%, 当特定波长的光子在谐振腔内获得的增益大于其在腔内获得的损耗时, 该波长的激光就从部分反射镜射出, 从而产生激光。

(三) 激励系统

激励系统或称泵浦源, 其作用是为工作介质提供能量, 即将原子由低能级激发到高能级所需要的能量。通常激励能源可以为光能源、热能源、电能源、化学能源等。通过强光照射工作介质而实现粒子数反转的方法称为光泵浦法。

例如钕铝石榴石激光器, 就是利用大功率的闪光灯或二极管激光器照射钕铝石榴石实现粒子数反转的, 从而构成产生激光的条件。大家熟悉的 He-Ne 激光器, 工作介质为氖气, 激励方式为直流气体放电, 当电子经电场加速后, 与 He 原子碰撞。处于激发态的 He 原子与 Ne 原子碰撞, 把能量传递给 Ne 原子, 从而使 Ne 原子在亚稳态 ($3s$ 、 $2s$) 和激发态 ($3p$ 、 $2p$) 之间形成粒子数反转分布。

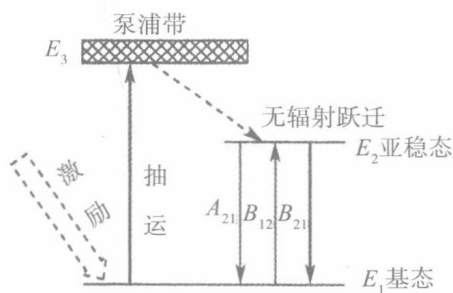


图 1-6 三能级系统

三、激活粒子的能级系统

为了实现粒子数反转必须有相应的能级系统使得粒子激活, 在激活粒子的能级系统中, 必须包括激光的上能级和激光的下能级, 以及其他一些与激光产生相关的能级。在实际中, 原子的多能级结构往往是很复杂的, 而且跃迁特性也不同, 为使问题简化, 在物理模型的建立过程中, 考虑到实际激光晶体的特点及其主要的跃迁过程, 最终归纳出两种具有代

表性的介质模型，即三能级系统和四能级系统模型。

(一) 三能级系统

如图 1-6 所示为三能级系统的示意图，它可以解释红宝石等光泵浦的三能级激光器工作原理。在三能级系统中，激光下能级为基态或是靠近基态的能级。 E_1 为基态，作为激光的下能级。最初，工作介质内所有的原子都处于最低能级 E_1 ，当工作介质在某些频率的辐射激励下， E_1 能级的粒子吸收辐射跃迁至宽带能级 E_3 。这一过程称为泵浦源使原子从基态跃迁至泵浦带。通常泵浦带（ E_3 能级）由很多能带组成，因此，光泵浦能够在较大的光谱范围内完成。 E_3 能级的寿命非常短，粒子很快便从 E_3 能级跃迁至介于 E_1 和 E_2 中间的很窄的 E_2 能级。在此跃迁过程中不发射光子，而是将损失的能量转移至晶格，这种跃迁称为无辐射跃迁。快速的无辐射跃迁将绝大多数受激原子转移至窄能级 E_2 。 E_2 能级的寿命要大于 E_3 能级的寿命，故称为亚稳态，将其作为激光上能级。经过泵浦后， E_2 能级和 E_1 能级之间很容易形成粒子数反转，当电子从 E_2 能级返回基态 E_1 能级时发射出一个光子，就产生了受激辐射。如果泵浦强度小于激光阈值， E_2 能级的原子就会以自发辐射的方式返回到基态 E_1 。

在一些三能级系统中，基态 E_1 并不作为激光下能级，而是以 E_2 能级和 E_3 能级作为激光的下能级和上能级，在热平衡条件下，及能级基本是空的，没有粒子数存在。只要将少数的粒子泵浦到 E_3 能级，就可以实现粒子数反转，粒子通过受激辐射可以到达 E_2 能级， E_2 能级上的粒子很快以非辐射跃迁的方式回到基态 E_1 。

(二) 四能级系统

如图 1-7 所示为四能级系统的示意图，玻璃或晶体基质材料中的稀土离子大多具有这种能级结构。在四能级系统中，激光下能级和基态能级之间仍然存在一个无辐射跃迁。粒子从基态（现为 E_0 ）提升到高于激光上能级 E_2 的一个或多个泵浦带 E_3 ，粒子快速通过无辐射跃迁到达激光上能级 E_2 。因此，泵浦带 E_3 上的粒子很快跃迁到寿命比较长的亚稳态 E_2 ，在亚稳态 E_2 上积累， E_2 的寿命比较长，作为激光的上能级。 E_1 能级的寿命非常短，在热平衡条件下， E_1 能级基本是空的，作为激光的下能级。这样，很容易造成亚稳态 E_2 上的粒子数多于激光下能级 E_1 上的粒子数，即粒子数反转。 E_2 上的粒子以辐射光子的形式放出能量回到激光的下能级 E_1 。这种自发辐射的光子被谐振腔反馈回增益介质中诱发受激辐射，产生的光子与诱发过程的光子性质完全相同。当光子在谐振腔内获得的增益大于其在腔内获得的损耗时，就会产生激光。

在一些四能级系统中， E_0 作为基态，而 E_2 能级和 E_3 能级作为激光的下能级和上能级，

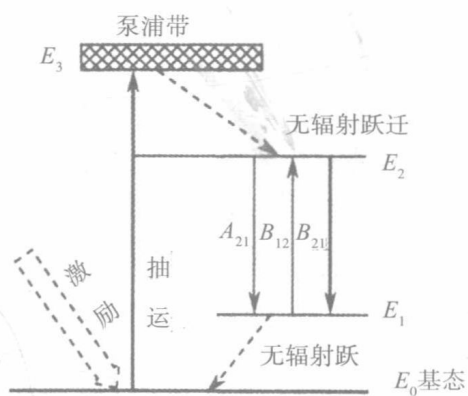


图 1-7 四能级系统

E_2 能级作为 E_2 能级和 E_3 能级之间的一个中间能级。公能级的寿命非常短，通过受激辐射跃迁从 E_3 能级达到 E_2 能级的粒子很快以非辐射跃迁的方式到达 E_1 能级，并很快再以非辐射跃迁的方式回到基态。在这种结构中，也很容易实现粒子数反转。

四能级系统与三能级系统实现粒子数反转的途径基本相同。不同的是，在四能级系统中，激光下能级 E_1 不是基态，在热平衡状态下 E_1 上的粒子数很少，基本是空的，很容易实现 E_2 与 E_1 两个能级之间的粒子数反转。而三能级系统中，下能级 E_1 是基态，通常情况下，粒子几乎全部处于基态，必须将一半以上的粒子激发到高能级时才能实现粒子数反转，这就需要较高的抽运功率。所以，三能级系统的激光阈值远高于四能级系统。

四、速率方程

激光的理论是在量子电动力学基础上建立的，可以描述激光的全部特性，但是这一描述非常复杂。人们在讨论激光理论时常采用一些近似的理论来讨论相关问题，例如通过一组联立的速率方程可以精确描述激光的动态特性。一般说来，虽然速率方程无法获得光谱、温度和空间分布等激光发射的某些特性，但却有助于预计激光输出的总体性能，如平均功率、峰值功率、Q 脉冲包络形状、阈值条件等，并且这些参数可以分别求出。

速率方程理论是把电磁场看成量子化的光子，把物质体系看成具有量子化能级的粒子体系，从而对泵浦光与激光介质之间的相互作用进行近似描述，这使该理论具有非常简单的形式。速率方程理论建立在自发辐射、受激辐射和受激吸收概率与爱因斯坦系数之间关系的基础上，根据具体的能级系统列出一系列相关能级上的粒子数随时间变化的微分方程。这些微分方程组称为粒子反转的速率方程组。

目前，常见的激光工作介质如 Nd:YLF、Nd:YVO₄、Nd:YAG 等，其辐射机理都是典型的四能级过程。四能级系统中产生激光的下能级不是基态能级，而是激发态能级，在常温下激光的下能级基本是空的。因此，四能级系统所需要的泵浦能量要比三能级系统小得多，产生激光也比三能级系统容易得多、效率也高，对四能级系统的研究更具有意义，因此本节只讨论四能级系统的速率方程。

四能级系统是指与激光发射相关的粒子能级主要归结为 4 个：泵浦能级 E_3 、激光上能级 E_2 、激光下能级 E_1 和基态能级 E_0 ，如图 1-8 所示。对泵浦能级的要求是要有较宽的吸收带，以便更好吸收泵浦能量，并且要有大的非辐射跃迁概率，这样才能成为激光上能级理想的粒子中转站。另外，激光上能级的寿命越长越好，而激光下能级的寿命越短越好，这样才容易实现粒子数反转。

假设从泵浦带到激光的上能级跃迁速率非常快，以至于可以忽略泵浦带的粒子数，即

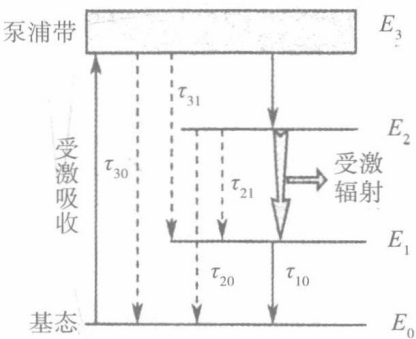


图 1-8 四能级系统能级结构简图

处 $N_3 \approx 0$, 这种假设下激光上下能级粒子数随时间的变化量关系, 即四能级速率方程式即

$$\frac{dn_2}{dt} = W_p n_0 - \left(n_2 - \frac{g_2}{g_1} n_1 \right) \sigma \phi c - \frac{n_2}{t_{21} + t_{20}}$$

$$\frac{dn_1}{dt} = \left(n_2 - \frac{g_2}{g_1} n_1 \right) \sigma \phi c + \frac{n_2}{t_{21}} - \frac{n_1}{t_{10}}$$

$$n_{\text{tot}} = n_1 + n_2 + n_0$$

式中, n_0 、 N_1 、 N_2 和 n_{tot} 分别表示基态能级 E_0 、激光下能级 E_1 、激光上能级 E_2 上的粒子数密度和所有能级上的粒子数密度之和; W_p 表示泵浦跃迁速率; g_1 和 g_2 分别表示激光下能级 E_1 和激光上能级 E_2 的简并度; σ 和 ϕ 分别表示受激辐射截面和光子密度; t_{ij} 表示能级 E_i 向能级 E_j 跃迁的弛豫时间。

用 Δn 表示反转粒子数密度, 则

$$\Delta n = \left(n_2 - \frac{g_2}{g_1} n_1 \right)$$

从四能级速率方程可以看出, 在四能级系统中, 激光上能级 E_2 上的粒子数由于泵浦而增多, 又由于向激光下能级 E_1 和基态能级 E_0 的受激辐射和自发辐射而减小。激光下能级 E_1 上的粒子数由于受激辐射和自发辐射而增多, 又由于向基态能级 E_0 的无辐射跃迁而减少。在理想的四能级系统中, 激光下能级以无限快的速度向基态能级消耗, 如果有 $N_1 \approx 0$, 则根据公式得 $n_0 \approx 0$ 。此时, 所有的粒子都分布在基态能级和激光的上能级上。系统似乎正被一个大的泵浦源泵浦, 而与激光下能级无关。

又由于 $N_2 \ll n_0$, 所以

$$n_{\text{tot}} = N_2 + n_0 \approx n_0$$

考虑到并非所有泵浦到 E_3 能级的原子最终都会终止于激光上能级 E_2 , 因而, 激光上能级及粒子数密度变化量表示式为

$$\frac{dn_2}{dt} = -n_2 \sigma \phi c - \frac{n_2}{t_f} + W_p (n_0 - n_2)$$

式中, T_f 表示激光上能级的荧光衰减寿命, 即

$$\frac{1}{t_f} = \frac{1}{t_{21}} + \frac{1}{t_{20}}$$