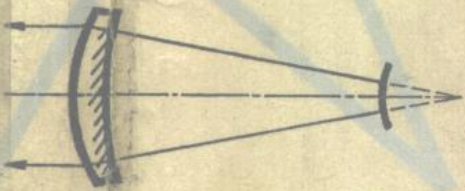


LASER

激光器件设计基础

姚文兵 董仁厚 编著



12

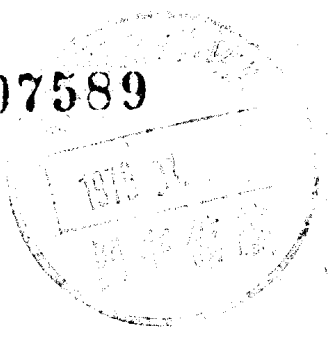
上海科学技术出版社

73.7714  
782

# 激光器设计基础

赫光生 雷仕湛 编著

1107589



上海科学技术出版社

**激光器设计基础**

赫光生 雷仕湛 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海中华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 22.75 插页 1 字数 546,000

1979 年 6 月第 1 版 1979 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1—25,000

书 号: 15119·1966 定 价: 2.25 元

# 前 言

激光科学技术是六十年代开始发展起来的最活跃的科学技术领域之一，也是我国科学技术发展规划中重点项目之一。它的出现，标志着人们对光的掌握和利用进入一个新阶段，有力地促进了物理学、化学和生物学的发展。激光在材料加工、精密测量、远距离测距、全息技术、通信、医疗、农作物育种等方面获得广泛应用；在同位素分离、催化、信息处理等方面有着广阔的发展前景。以激光引发核聚变是探索实现受控热核反应的重要途径之一。

随着激光技术的日益普及与发展，从事激光器研制与使用的专业队伍不断扩大，各类激光器件的品种不断增加，性能不断得到改善，并且有越来越多的器件，逐渐由实验室研究阶段进入定型批量生产和各种实用化阶段。在这样的形势下，有必要在深入研究各类激光器件运转规律和输出特性的基础上，合理地总结出根据使用要求之不同而确定器件设计的原则和参数选择标准，以便进一步改进已有激光器件的运转水平和输出激光质量。为此，我们在结合科研工作和教学实践的基础上，参考了国内外有关资料和成果，编写了《激光器设计基础》一书，供从事激光技术的专业人员作为参考。

全书共分十章，着重介绍各种常用气体和固体激光器的工作物质、基本结构、设计原则、制备工艺、工作状态、输出特性和改进途径。气体器件，以氦-氖激光器和二氧化碳激光器为主，也介绍了其他多种常用的气体激光器；固体器件，以掺钕钇铝石榴石激光器、红宝石激光器以及钕玻璃激光器为主，也介绍了几种其他新型晶体激光器。在书后的附录中，还适当选编了有关的参考数据和实物照片。由于篇幅的限制和考虑到国内的实际应用状况，本书对半导体和液体激光器没有作专门的介绍。

本书在编写过程中，不少同志提供了宝贵的资料和帮助，特别是第十章，由王宏宇同志协助编写，在此谨致感谢。由于作者水平所限，书中会有一些缺点和错误，我们热诚地希望广大读者批评指正。

赫光生 雷仕湛

一九七九年一月

# 绪 论

激光技术的诞生，以1960年第一台固体激光器——红宝石激光器及1961年第一台气体激光器——氦-氖激光器的先后研制成功为标志。

激光技术所以具有如此强大的生命力和应用潜力，主要在于激光器的发光机理，完全不同于以往任何一种普通光源，从而从根本上突破了以往所有光源的种种局限性(低亮度、低定向性、低单色性等)，赋予古老的光学学科以新的生命力，引起现代光学应用技术的革命性进展，促进了许多基础学科和应用技术学科的新发现与新发展。

激光器发出的激光辐射，具有一系列从根本上区别于普通光的特点，这些特点，可用不同的方式或从不同的方面加以描述。用比较通俗直观的术语来描述，激光具有高定向性、高单色性或高相干性特点；用辐射光度学的术语来描述，激光具有高亮度特点；用统计物理学的术语来描述，激光具有高光子简并度特点；从电磁波谱学的角度来看，激光可以是极强的紫外或红外辐射以及具有可调谐(可连续变频)特点等等。利用激光的上述特点，就可以在现代科学技术这一领域广阔的“舞台”上，演出许多别开生面和丰富多采的“节目”。

首先来看一下如何充分利用激光的高单色性特点。激光器出现以前，单色性最好的光源为氩-86灯，其发光波长为 $\lambda=6057$ 埃，谱线宽度为 $\Delta\lambda=0.0047$ 埃，单色性程度为 $\Delta\lambda/\lambda\approx 10^{-6}$ 量级。这意味着用这种光去进行精密干涉测长，最大量程不超过1米，测量误差约为1微米左右。而现在若采用稳频和单频的特种氦-氖激光器装置，输出激光单色性可达 $\Delta\lambda/\lambda\approx (10^{-10}\sim 10^{-13})$ 量级，这意味着用这种激光去进行干涉测长，量程在原则上可扩展到1公里至1千公里以上，而相当于1千公里上的测量误差，可达到小于 $10^2\sim 10^{-1}$ 微米量级。利用激光的高单色性特点，不但可极大提高各种光学干涉测量方法的精度和量限；而且在原则上，提供了建立以激光为标准的新的长度、时间和频率标准的可能性。例如，以稳频和单色程度为 $10^{-13}$ 量级的激光作为光频标，它在一年长时间内所给出的计时误差不超过百万分之一秒，这在数量级上已大大超过目前的微波原子频标的精度水平。以高单色的激光作为光频相干电磁载波，可同时传送或存贮、处理大量信息。一条普通的激光通信通道，按其信息携带容量来讲，在原则上，可同时传送地球上所有电视台、广播台的节目，以及所有电话间的对话信息。利用激光的高单色和可调谐特点，并结合光学外差和光电拍频等新方法，可以建立起全新的超高分辨率光谱分析技术，从而对物质的精细能级结构和光谱跃迁特性，进行比以前深入得多的研究；另一方面，利用高单色和可调谐激光，还可对各种物理、化学、生物学等过程，进行高选择性的光学激发，从而达到对有关过程进行深入研究和控制的目的。在这方面，激光分离同位素的工作具有很重大的意义。例如，利用铀的不同同位素在单色激光的选择性激发下所呈现出的不同反应特点，有可能使主要的裂变原子能原料——铀-235的分离和浓缩程序大为简化，提纯效率大为提高，这方面的工作最后若获得成功，有可能引起原子能技术的进一步发展。

再来看一下如何充分利用激光的高定向性特点。在激光器出现以前，所有各类光源的发光都是非定向的，光能分布在空间很大发散角范围内，因此不能集中在确定的方向上发射

到较远的距离。就拿由于采用了定向聚光反射镜而定向性较好的探照灯光束为例，其发射口径为1米左右的光束的平面发散角，也只能压缩到10毫弧度量级左右，这意味着光束传输到1公里外的距离后，光斑直径已扩大为10米左右。而激光器发出光束的定向性，可在数量级上大为提高。例如，由输出为单横模的激光器所发出的光束，设其经过发射望远镜后的光束口径也为1米，则由衍射极限角所决定的平面发散角只有 $10^{-3}$ 毫弧度，这意味着光束传输到1000公里外的距离后，光斑也只有扩大到几米左右。激光束的高定向性，表明它具有在极远的距离上传输光能、光的探测信号以及传递控制指令的能力，从而可进行远距离激光通信、测距、雷达，以及进行激光导航、遥控、指向、信标等项应用。在这方面，月、卫星激光测距和宇宙飞船的激光对接控制等，都是引人注目的激光应用成就；而远距或超远距离的激光定向通信，在今后的空间和宇宙航行技术中，也必将起着重要的作用。

光源发光能力大小的一个最重要的综合标志是亮度，它定义为单位发光表面向空间单位立体角内发射出的光功率大小。激光器出现以前，所有光源的发光亮度值都是很低的，例如太阳的发光亮度也只有 $10^3$ 瓦/(厘米<sup>2</sup>·球面度)量级左右，而普通的气体 and 固体激光器的发光亮度，一般在 $10^5 \sim 10^{10}$ 瓦/(厘米<sup>2</sup>·球面度)量级左右，特别是采用Q突变技术的大功率脉冲固体激光器，其输出激光亮度可高达 $10^{14} \sim 10^{17}$ 瓦/(厘米<sup>2</sup>·球面度)量级以上，亦即比太阳的亮度高几千亿倍以上。激光辐射的高亮度特性，不但意味着可将激光能量不分散地传输到极远的距离，而且意味着激光能量可在时间上和空间上高度集中，这种集中的程度和它所产生的效果，在一定的意义上来说，可与核武器的爆炸效果相比。不难想像，利用强激光辐射的高亮度特点，在原则上可作为一种光辐射武器，来达到摧毁或破坏一些高速或高空飞行目标(如飞机、巡航导弹、弹道导弹、人造卫星等)的特殊目的。除了用于破坏目的以外，利用特大功率和超高亮度的会聚激光辐射，可在空间极小范围内造成极大的光能密度，产生几千万度以上的高温等离子体，从而有可能对热核聚变反应进行激光点火。到目前为止，已在多种实验条件下，观测到由激光引发的表明初步热核聚变反应的强中子信号；特别是近几年来，由于采用了以多路激光束从空间各个方向，同时会聚辐照含聚变燃料的靶丸而产生的向心爆炸压缩原理，使人们在努力实现激光引发可控热核反应的道路上又向前大大跨进了一步；今后，在这方面的目标如能终于获得成功，无疑将是人类能源利用技术上的又一次重大变革。利用普通激光器的输出激光的高亮度特点，还可很容易作为一种光学加工手段，对各种材料和产品进行特种加工；例如，已比较成熟的应用有激光打孔、切割、焊接，此外尚有激光熔炼、淬火、退火、划线、蚀刻、表面处理等。

最后，利用激光辐射可以是不可见光(红外或紫外)这种特点，可在各种科学研究和现代军事技术中发挥很大的作用。例如，在军事应用方面，可利用红外激光进行保密性激光通信、测距、照相、夜视、预警和武器制导或自动引爆等；在这方面，最有代表性的应用实例，是装配在坦克、飞机、军舰和阵地上的军用激光测距仪，以及以激光作为主动或半主动制导的炸弹和战术导弹，这些应用装置，已开始进入战场实验，并取得比较显著的成效。

自从第一台激光器问世后，人们围绕着激光器件本身作了大量的研究试制工作。这些工作可分为如下几个方面：

(1) 激光工作物质的研究——在这方面，人们取得的成果是相当可观的。目前，已实现激光作用的工作物质数目达数百种以上，其中包括了气体(原子气体、离子气体、分子气体、准分子气体)、固体(晶体和玻璃)、半导体、液体物质等几大类。



(2) 激光产生机理的研究——这方面的工作，包括探索适合粒子数反转的能级结构和跃迁特性，寻找实现粒子数反转的各种新的激励方法(如化学反应激励、核能激励等)，以及进一步发展产生相干光辐射的新途径(如自由电子激光器)等。

(3) 扩展激光发射的频谱范围——至目前为止，单单是由各种激光器直接发射出的振荡谱线数目，已达几千条以上，遍布从真空紫外经过可见光区直到远红外的广阔光谱区域，其中波长最短的已达1千埃左右(如 $H_2$ 激光器的1100埃谱线)，波长最长的已达亚毫米波区域(如HCN激光器的774微米谱线)。现在，人们正在努力把激光振荡谱线进一步向两个边缘方向扩展，特别是实现X射线和 $\gamma$ 射线激光器的可能，仍然是人们正在努力探索的重要课题之一。

(4) 对已有激光器件的改进——在深入研究已有各类器件运转过程和输出特性的基础上，人们不断总结提高器件效率和改善输出激光质量(亮度、单色性、定向性、场图均匀性等)的有效途径；其中一些最常用的激光器，则逐渐进入设计最佳化、定型生产化和各种应用场合下的实用化阶段。

我国自六十年代初，即开始了对激光器的研究发展工作，并在这一新兴领域内的许多方面，取得不少的进展和可喜的成就。现在，激光技术已被正式列为我国长远科学技术发展规划中的重点项目。为了使我国的激光技术更快地得到发展，为早日实现四个现代化发挥更大的作用，我们除了要迅速提高常用激光器的水平外，还应当积极进行新型激光器的研制以及产生强激光辐射的新机理的探索，使得我国激光技术在不久的将来达到和超过世界先进水平。

# 目 录

前 言

绪 论

<b>第一章 激光器的基本知识</b> .....	1
§ 1-1 激光器的工作原理 .....	1
(一) 光与物质相互作用的三种基本过程 .....	1
(二) 粒子数反转和受激发射 .....	2
§ 1-2 激光器的基本组成 .....	3
(一) 激光工作物质 .....	3
(二) 激励系统 .....	5
(三) 光学共振腔 .....	7
§ 1-3 激光器的种类 .....	8
(一) 按工作物质分类 .....	8
(二) 按运转方式分类 .....	10
(三) 按激励方式分类 .....	11
(四) 按波段范围分类 .....	12
§ 1-4 激光器输出光束的质量评价 .....	13
(一) 激光束的定向性 .....	13
(二) 激光束的单色性 .....	14
(三) 激光束的亮度特性 .....	15
(四) 激光束的光子简并度特性 .....	16
(五) 激光束的相干特性 .....	17
(六) 激光束的偏振特性 .....	17
(七) 激光束的场图均匀性 .....	18
<b>第二章 光学共振腔的设计原理</b> .....	19
§ 2-1 共振腔和波型特性概述 .....	19
(一) 共振腔的作用 .....	19
(二) 波型(模)的含义和总波型数的求法 .....	20
(三) 腔内波型(模)的具体区分方法 .....	21
(四) 共振腔特性的分析要点 .....	22
(五) 共振腔的分类和应用范围 .....	23
§ 2-2 稳定共振腔的特性和设计 .....	24
(一) 腔的稳定条件的光学矩阵推导 .....	24
(二) 腔的稳定工作区域 .....	26
(三) 一般稳定腔衍射理论的有关结论 .....	28
(四) 稳定腔振荡光束的总尺寸和总发散角 .....	32
(五) 稳定腔的应用特点 .....	34
§ 2-3 介稳共振腔的特性和设计 .....	34



(一) 介稳腔的种类和一般特点	35
(二) 平行平面腔的波型特性	35
(三) 虚共心腔的波型特性	37
(四) 平面腔和虚共心腔的应用特点	39
§ 2-4 非稳定共振腔的特性和设计	42
(一) 非稳腔的种类和一般特点	42
(二) 双凸和平凸型非稳腔	43
(三) 望远镜型非稳腔	46
(四) 非稳腔的应用特点	47
§ 2-5 波型限制技术和特种腔	48
(一) 激光振荡的多波型特点	48
(二) 对横波型(发散角)的限制技术	49
(三) 对纵波型(振荡频率)的限制技术	50
<b>第三章 气体放电和真空的获得</b>	<b>56</b>
§ 3-1 气体放电现象和着火电压	56
(一) 气体放电现象	56
(二) 气体放电着火电压	57
(三) 气体放电中带电粒子的定向运动	58
(四) 阴极溅射	59
(五) 电子平均自由程和电子温度	60
§ 3-2 气体放电中的激发和消激发	61
(一) 第一类和第二类非弹性碰撞	61
(二) 气体放电中的激发过程	61
§ 3-3 气体放电中的电离过程和放电稳定性	65
(一) 电离过程	65
(二) 放电的稳定性	67
§ 3-4 脉冲放电和真空系统	71
(一) 脉冲放电	71
(二) 真空系统	74
<b>第四章 氩-氦激光器</b>	<b>78</b>
§ 4-1 结构和各部件要求	78
(一) 几种结构形式	78
(二) 放电管	79
(三) 共振腔	83
§ 4-2 建立能级粒子数反转的原理和工作特性	84
(一) 建立能级粒子数反转的机理	84
(二) 工作特性	86
§ 4-3 输出特性和器件寿命	89
(一) 输出功率	89
(二) 光束的相干性和方向性及其稳定性	93
(三) 输出功率的漂移和噪声	94
(四) 输出的激光波长和频率稳定性	96

(五) 氦-氖激光器的寿命	100
(六) 激光器的张弛振荡	104
§ 4-4 器件设计	104
§ 4-5 制造工艺	107
(一) 磨管	108
(二) 清洗	113
(三) 贴反射镜	113
(四) 阴极处理和真空除气	116
(五) 放电老化	117
§ 4-6 布儒斯特角窗口的研磨和贴片	118
<b>第五章 二氧化碳分子激光器</b>	<b>121</b>
§ 5-1 工作原理	121
(一) 分子结构和振-转能级跃迁	121
(二) 能级寿命和弛豫过程	124
(三) 激发过程	128
§ 5-2 封离式电激发 CO <sub>2</sub> 分子激光器	131
§ 5-3 工作特性	137
(一) 共振腔内的气体类透镜效应和腔的选择	137
(二) 增益系数和饱和强度	142
(三) 输出功率	147
(四) 提高输出功率的考虑	148
§ 5-4 输出激光频谱和转动竞争效应	163
§ 5-5 器件寿命	166
§ 5-6 器件设计	167
§ 5-7 制造工艺	169
<b>第六章 其他类型电激励气体激光器</b>	<b>172</b>
§ 6-1 高气压 CO <sub>2</sub> 分子激光器	172
(一) 高气压 高功率输出	172
(二) 输出功率的估计	173
(三) 气体成分对输出功率的影响	175
(四) 激光脉冲形状和增益 Q 开关	176
(五) 转动谱线重迭和锁模	179
(六) 高气压均匀放电技术	180
(七) 电极形状设计	186
§ 6-2 氮分子激光器	188
(一) 工作原理	189
(二) 器件结构	190
(三) 输出功率	192
(四) 脉冲重复频率	198
(五) 激光脉冲形状	198
§ 6-3 准分子激光器	199
(一) 快放电激发	200

(二) 电子束激发 .....	203
§ 6-4 离子激光器 .....	205
(一) 激发机理 .....	205
(二) 工作特性 .....	206
(三) 器件结构 .....	208
§ 6-5 金属蒸汽激光器 .....	210
(一) 工作原理 .....	211
(二) 器件结构 .....	211
(三) 工作特性 .....	213
<b>第七章 掺钕钇铝石榴石晶体激光器 .....</b>	<b>216</b>
§ 7-1 掺钕钇铝石榴石晶体性质 .....	216
(一) 晶体的物化特性 .....	216
(二) 晶体的光学和发光特性 .....	216
(三) 晶体的光学质量 .....	220
§ 7-2 YAG:Nd <sup>3+</sup> 激光器的基本组成 .....	221
(一) YAG:Nd <sup>3+</sup> 激光晶体棒 .....	221
(二) 激励光源 .....	222
(三) 聚光器 .....	226
(四) 冷却和滤光装置 .....	231
§ 7-3 连续 YAG:Nd <sup>3+</sup> 激光器件 .....	234
(一) 器件规模和质量评价标准 .....	234
(二) 影响器件效率的诸因素 .....	235
(三) 器件效率和输出发散角 .....	235
(四) 晶体棒热透镜效应及补偿方法(介稳腔法) .....	237
§ 7-4 重复脉冲和倍频 YAG:Nd <sup>3+</sup> 器件 .....	242
(一) 低重复率脉冲调 Q 器件 .....	242
(二) 连续光泵高重复率脉冲调 Q 器件 .....	247
(三) YAG:Nd <sup>3+</sup> 倍频器件 .....	250
<b>第八章 红宝石及其他晶体激光器 .....</b>	<b>253</b>
§ 8-1 红宝石晶体的性质 .....	253
(一) 红宝石晶体的物化特性 .....	253
(二) 红宝石晶体的光学和发光特性 .....	253
(三) 红宝石晶体棒的质量评价和加工要求 .....	256
§ 8-2 红宝石激光器件 .....	257
(一) 红宝石激光器件的一般特点 .....	257
(二) 连续光泵红宝石激光器 .....	259
(三) 脉冲调 Q 红宝石激光器 .....	260
(四) 限模红宝石激光器 .....	264
§ 8-3 其他晶体激光器 .....	267
(一) 概述 .....	267
(二) 掺钕铝酸钇 (YAlO <sub>3</sub> :Nd <sup>3+</sup> ) 晶体 .....	269
(三) 五磷酸钕(NdP <sub>5</sub> O <sub>14</sub> ) 和四磷酸锂钕 (LiNdP <sub>4</sub> O <sub>12</sub> ) 晶体 .....	271

(四) 掺钕铍酸钪 ( $\text{La}_2\text{Be}_2\text{O}_5:\text{Nd}^{3+}$ ) 晶体和掺钕钒酸钇 ( $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$ ) 晶体	273
(五) 掺其他稀土激活离子的晶体	275
<b>第九章 钕玻璃激光器</b>	<b>277</b>
§ 9-1 钕玻璃的基本性质	277
(一) 激光钕玻璃概述	277
(二) 钕玻璃的制造工艺	279
(三) 钕玻璃的质量评价	281
(四) 钕玻璃定型产品介绍——国内产品	283
(五) 钕玻璃定型产品介绍——国外产品	286
§ 9-2 钕玻璃的激光特性	288
(一) 钕玻璃的光谱性质	288
(二) 钕玻璃的激光增益特性	292
(三) 钕玻璃的光泵热效应	294
(四) 钕玻璃的劣化效应	297
(五) 钕玻璃的激光破坏	299
§ 9-3 钕玻璃激光器件特性	303
(一) 钕玻璃激光器件概述	303
(二) 重复率钕玻璃激光器件	305
(三) 调 Q 钕玻璃器件	310
<b>第十章 固体激光器电源</b>	<b>316</b>
§ 10-1 连续激光器电源	316
§ 10-2 低重复率脉冲激光器电源	321
§ 10-3 高重复率脉冲激光器电源	329
<b>附 录</b>	
一、在 $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (或 He) 混合气体中 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 分子振动弛豫速率	334
二、正则复变函数及保角变换	335
三、国产 2X 系列旋片式机械泵性能指标	336
四、洗液	336
五、气体激光器粘合腔片用的几种胶合剂配方	337
六、几种金属反射率(垂直入射 %)	337
七、 $\text{CO}_2$ 激光器用的多层介质膜(锗片上镀 Ge-ZnS)的反射率	338
八、聚脂薄片电容板的制作	338
九、几种气体的亚稳激发电位和电离电位(伏)	338
十、几种电极材料的焊接性质	339
十一、激光器光学元件加工要求图例	339
十二、固体激光器总体机械设计图例	340
十三、常用激光器(部)件实物照片图例	348

# 第一章 激光器的基本知识

## § 1-1 激光器的工作原理

我们从光与物质相互作用的基本过程出发,逐步介绍激光器的基本工作原理。

### (一) 光与物质相互作用的三种基本过程

任何种类的物质都是由一些基本的粒子(通常为原子、离子或分子)所组成的,组成物质的这些粒子可分别处于不同能量的状态,或者说,处于具有不同能量水平的不同能级上。一般说来,粒子可能具有的能量的分布不是连续变化的,因此粒子可能处于的能级的分布也是分立的。当粒子所具有的能量发生变化,或者说当粒子由某个能级向另外一个能级跃迁时,必然伴随着粒子与外界能量的交换。我们在这里,着重考虑粒子能量与外界光能之间的转换或交换过程。

按照光与物质相互作用的量子理论,组成物质的粒子体系,可通过三种基本方式同外界光辐射场相互作用和彼此交换能量。对于物质中处于较低能级的粒子而言,可以吸收特定频率的外界光辐射场的能量(光子)而跃迁到较高的能级,这种过程,称为粒子对入射光场的受激吸收过程,或简称为吸收过程。对于物质中处于较高能级的粒子而言,它们可以通过两种方式向外界发射出特定频率的光场能量(光子)。其中一种是以不依赖于外界光场的方式,自发地辐射出一个特定频率的光子而跃迁到较低的能级,此过程称为自发辐射过程;而另一种则是在外界特定频率的入射光场作用下,被迫地或受激地辐射出一个特定频率(与入射光频率相同)的光子而跃迁到较低的能级,此过程称为受激发射过程。

辐射的量子理论不但指明了光与物质相互作用的三种基本过程的存在,而且还能定量描述三者之间的关系。例如,对于粒子体系的任意两个高、低能级而言,在特定频率的入射光场作用下,处于较低能级的单个粒子在单位时间内吸收一个入射光子而跃迁到较高能级的几率,恰好等于处于较高能级的单个粒子在单位时间内受激发射出一个光子而跃迁到较低能级的几率。

在一般情况下,亦即粒子体系不受到外界的特殊干扰或能量的激励作用的话,粒子数按不同能量状态或能级的统计分布,服从或近似服从玻尔兹曼分布规律,即处于能量值为  $E_n$  的能级的粒子数目  $N_n$  可表示为

$$N_n = C e^{-E_n/kT}, \quad (1-1)$$

式中  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为粒子体系的绝对温度,  $C$  为比例常数。按照这一统计分布规律,处于较高能级的粒子数,总是小于处于较低能级的粒子数,并且能级越高( $E_n$  越大),粒子数分布就越少。在上述情况下,当一定频率的外界光场入射到粒子体系中时,处于较低能级的粒子集合向较高能级的吸收跃迁的总的几率,将大于处于较高能级的粒子集合向较低能级的受激发射的总的几率;因此,粒子体系对入射光场表现出的总的效果,是吸收作用占

优势,亦即入射光通过这样的普通介质(假定它不受到其他形式的外界激励作用)时,总受到不同程度的衰减,并且这种衰减的程度,正比于低、高能级上的粒子数之差。

现在再来讨论一下自发辐射的情况。自发辐射的特点,是它不依赖于外界光场的特性,即使在无外界光场入射情况下,处于较高能级的粒子,仍有自发地辐射出一个光子而跃迁到较低能级的趋势或几率。只不过由于一般情况下物质中处于高能级的粒子数总是比较少的,因此这种自发辐射效应是比较微弱或难以觉察的。为了加强物质的自发辐射效应,可以采取一定的激励方式(如加热、气体放电、射束辐照),人为地使发光物质中处于高能级的粒子数大大增加,从而使粒子体系的总的自发辐射效应得到增强,这正是激光技术出现以前普通光源(热光源、气体放电光源、荧光光源)的发光机理。由于在普通光源情况下,通过激励作用而达到较高能级的粒子数总是有限的(一般不会超过较低能级的粒子数),因此决定了光源的发光能力是很有限的;其次,由于自发辐射出的光子是在空间所有方向上杂乱分布的,因此决定了光源发光的定向性很差;最后,还应考虑到,一般光源的发光,是处于许多较高能级的粒子,同时向许多较低能级的自发跃迁所产生的。一对能级间的跃迁只产生一种频率的光子,而许多对能级间的同时跃迁,自然要产生许多种频率的光,因此光源的单色性受到很大限制。综上所述,普通光源的自发辐射机理,决定了它的低亮度性、低定向性和低单色性等弱点。

## (二) 粒子数反转和受激发射

与上面分析过的一般情况相对照,可以设想物质中的粒子体系处于一种特殊的状态,亦即通过某种人为的方法,在粒子体系某些特定的能级之间,实现粒子数反转,即使得特定较高能级的粒子数,大于特定较低能级的粒子数,粒子体系这样一种特殊的状态,称为粒子数反转状态。自然可以进一步设想,当一定频率的外界光场入射到处于粒子数反转状态的物质中时,处于较高能级的较多的粒子集合向较低能级上受激发射的总几率,将大于处于较低能级的较少的粒子集合向较高能级上吸收跃迁的总几率;因此,粒子体系对入射光场表现出的总效果,是受激发射作用占优势,亦即入射光通过这样的物质中时,将得到不同程度的增强,并且这种增强作用的大小将正比于高、低能级上的粒子数之差(粒子数反转程度的大小)。用更直观的光子的概念来描述,当一定状态的光子集合入射到处于粒子数反转分布的特殊介质中时,由于受激发射作用占优势,故使入射光子数得到增加(增加的程度同粒子数反转程度成正比),并且所增加的那些受激发射光子的状态,同入射光子的状态(指频率、行进方向、偏振性质)完全一致。这就是所谓光的相干放大作用,或光的受激发射放大作用,这种作用是激光赖以产生的最根本的因素。

图 1-1 表示就粒子体系特定的两个能级而言,自发辐射、受激吸收和受激发射三种过程的物理图象。其中图(a)为没有外界入射光场时,处于高能级的粒子自发辐射一个光子并跃迁到低能级的情况,辐射出的光子的能量为:

$$h\nu = E_2 - E_1, \quad (1-2)$$

这里  $\nu$  为光子频率,  $h$  为普朗克常数,  $E_2$  和  $E_1$  分别为粒子在高、低能级上具有的能量。图(b)为受激吸收的情况,亦即在频率恰好为  $\nu$  [满足条件(1-2)式]的外界入射光子作用下,低能级的粒子吸收入射光子而跃迁到高能级。图(c)为受激发射的情况,亦即在同样频率  $\nu$  的外界入射光子作用下,已处于高能级的粒子受激发射同样状态的光子而跃迁到低能级。图

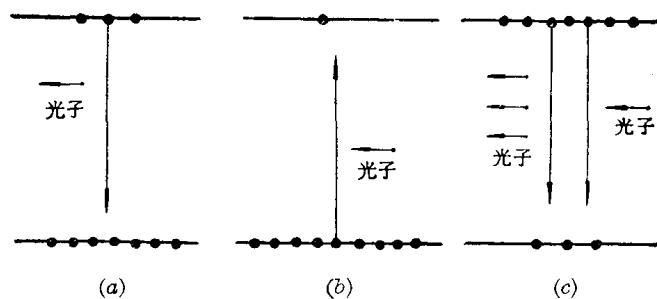


图 1-1

(a) 自发辐射; (b) 受激吸收; (c) 受激发射

1-1 中(a)、(b)所表示的均是粒子数分布没有发生反转的情况,它们分别对应于普通光源的发光和普通介质对光的吸收情况,图 1-1(c)则表示粒子数分布反转的情况,这实际上对应着激光工作物质运转时的情况。

基于粒子数反转体系的受激发射作用,可以进一步设计一种实际的装置,使得上述光的受激发射的放大作用,能够在处于粒子数反转状态的特殊工作物质中反复多次进行,这样就可实现光的受激发射作用的持续振荡,其中一部分受激发射的振荡光能输出装置之外形成激光,这样一种实际的装置,就称为激光器。

## § 1-2 激光器的基本组成

各种激光器的基本组成都是相同的,即都由工作物质、激励(泵浦)系统和光学共振腔三个基本部分所构成。

### (一) 激光工作物质

激光工作物质是组成激光器的核心部分,它是一种可以用来实现粒子数反转和产生光的受激发射作用的物质体系,本身可以是固体(晶体、玻璃等)、气体(原子气体、离子气体、分子气体)、半导体、液体(有机或无机液体)等材料。

固体工作物质,一般是将具有适当能级结构和发光能力的所谓杂质金属离子,掺入晶体类或玻璃类基质材料中而成的,其中掺入的杂质金属(通常为过渡金属或稀土金属)离子起光的受激发射作用,并被称为产生激光的工作粒子。

气体工作物质,可以由单种气体组成,但在更多情况下则是由多种气体混合组成。在后一情况下,只有一种成分的气体粒子(可以是原子、离子或分子),起粒子数反转和产生受激发射作用;而其他成分的气体粒子,对实现和维持上述工作气体粒子的粒子数反转,起着不同程度上的有益的辅助作用(如激励能量的传递或激光跃迁低能级上粒子数的去空)。

半导体工作物质,可以是面结型半导体材料,也可以是单晶型块状半导体材料。在这一类材料中,是依靠一定的激励方式,在导带与价带的特定区域间,实现非平衡载流子粒子数反转和产生受激光发射作用的。

液体工作物质,通常包括无机液体材料和有机染料液体材料两类。前一类是将特定的金属化合物溶于适当的溶液中,产生受激发射作用的是所掺入的特定杂质金属离子;后一类则是将有机染料溶于适当的有机溶剂中,产生受激发射作用的是有机染料分子。



对上述各类激光工作物质而言,均应满足一些共同的基本要求,即尽可能在其工作粒子的特定高、低能级间实现较大程度的粒子数反转,并且在实现反转后和产生受激光发射作用的过程中,使粒子数反转尽可能被有效地保持下去。为此,激光工作物质最好能具有如下几方面特性:

(1) 有较多的工作粒子在一定激励方式作用下,可以有效地跃迁到一些较高的激发能级之上。这种特性,可称为工作粒子易于被有效激励的特性。

(2) 被激励到较高激发能级的工作粒子,有易于在一个(或少数几个)较高能级上得到积累或集居的趋势,从而可相对于某一(或某些)较低能级间实现粒子数反转。这种特性,可称为工作粒子易于在激光作用高能级上得到积累或集居的特性。

(3) 工作粒子在产生受激发射作用并跃迁到激光作用的低能级后,有以一定方式尽快离开这些能级的趋势,从而有利于维持高、低能级间的粒子数反转。这种特性,可称为激光跃迁低能级上工作粒子易于被去空的特性。

上面提到的三种特性,是理想的工作物质在原则上应该具备的,但对任何一种实际的工作物质而言,均不能完备地同时具有这几种特性。有时为了弥补某些工作粒子在某些特性方面的不足,可采取一些辅助的措施。例如,采取工作物质敏化的方式或者辅助粒子能量传递的间接方法,可增强工作粒子易于被激励的特性;采取降低温度或者辅助粒子的能量转移消激发的方式,可加强工作粒子在激光作用低能级上的去空特性。

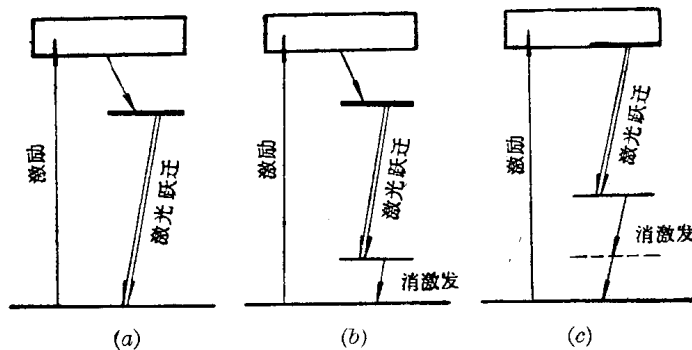


图 1-2 激光工作物质能级原理图

(a) 三能级结构; (b) 四能级结构; (c) 类四能级结构

图 1-2 绘出了激光工作物质的几种典型的能级结构的原理示意图。在图中,最低的能级表示工作粒子的基能级(基态),一般情况下该能级上的粒子数分布最多。在一定方式的外界激励(例如光辐照、放电、粒子碰撞)作用下,基能级上的较多的粒子可以吸收外界激励能量而跃迁到一些较高的激发能级之上,这些能级一般不是单个能级,而是一组十分靠近的多重能级或者是几组这样的多重能级,可以把它们称为工作粒子的激励能级(图中以方框型能级来表示)。工作粒子达到这些能级之后,有以一定方式(如非辐射跃迁、级联跃迁等)集居在这些激励能级中的一个(或几个)之上的趋势[如图(c)],或者有集中在距这些激励能级尚有一定间隔的一个(或几个)较低激发能级上的趋势[如图(a)和(b)],从而可在这些特定的能级(图中以粗线表示)上实现粒子数积累。当特定激发能级上的粒子数积累达到一定程度后,就可相对于某些特定的低能级而言,产生粒子数反转和相应的受激光发射(图中以双线表示受激发射跃迁)。受激发射的终止能级(或称为激光低能级),一般是在基能级之上

的某些较低的能级[如图(b)和(c)],特殊情况下,也可以是基能级本身[如图(a)].在图(b)、(c)的情况下,完成受激发射作用而到达激光低能级上的工作粒子,应能以一定方式(非辐射跃迁、自发辐射跃迁、碰撞弛豫等),尽快离开该能级,以维持粒子数反转,这个过程称为激光低能级上粒子数的去空或消激发过程。

图 1-2(a)称为三能级结构,其主要特点是激光跃迁低能级为基能级本身,因此为了实现粒子数反转,就必需把一半以上的工作粒子激励到激光跃迁高能级之上。实际采用的掺铬红宝石晶体工作物质( $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ ),就是比较典型的三能级结构系统,其产生激光作用所要求的外界激励阈值水平较高。

图 1-2(b)称为四能级结构,其主要特点是激光跃迁低能级在基能级之上足够高的位置,在通常情况下,该能级上的粒子数分布可以忽略,因此很容易相对于激光高能级而言实现粒子数反转。实际采用的钕玻璃工作物质和掺钕钇铝石榴石晶体( $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$ )物质,均为典型的四能级结构系统,其特点是为产生激光作用所要求的外界激励阈值水平较低,整个系统的激光产生效率比三能级系统要高。

图 1-2(c)称为类四能级结构,其特点是激光跃迁高能级本身也属于激励能级,而除此以外的性质则和图(b)的四能级结构基本相似,这就是说,激光跃迁低能级也离开基能级足够高。在通常情况下,该能级上的粒子数分布可以忽略,完成激光跃迁作用而到达该能级的粒子,应尽可能迅速离开该能级,直接回到基能级或者再经过一个中间能级而最后回到基能级。气体工作物质(如 He-Ne 系统、 $\text{Ar}^+$  系统、 $\text{CO}_2$  系统)激光作用的有关能级特性,基本上近似于这里所讨论的类四能级结构。

## (二) 激励系统

为使给定的激光工作物质处于粒子数反转状态,必须采用一定的激励方式和激励装置。根据工作物质特性和运转条件之不同,可采取不同的方式和装置来达到这一目的。就已经实现激光作用各类激光工作物质来说,经常采用的激励方式和激励装置分别有:

### (1) 光学激励(光泵)

利用外界光源发出的光来辐照工作物质以实现粒子数反转,称为光学激励或简称为光泵。几乎是所有的固体(晶体和玻璃)激光器、液体激光器以及个别的半导体和气体激光器,均采用此种激励方式。例如,对于固体和液体激光工作物质而言,一般均在光谱的特定区域(可见区、近红外区或近紫外区)有比较强的吸收谱线或吸收谱带,而与这些吸收谱线或谱带所对应的激励能级(在光泵作用下,工作物质基能级上粒子被抽运到这些能级),均在不同程度上对激光跃迁上能级的粒子数积累有贡献,因此在外界光泵作用足够强的情况下,有可能在工作物质特定的能级间实现粒子数反转和产生受激发射。

在实际激光器中,光学激励系统通常是由激励光源和聚光器两部分组成的。光源一般采用发光能力较强的气体放电光源(高压氙灯、氩灯等)或卤-钨灯光源。这些光源的发光一般具有连续的发光光谱,或者在连续光谱背底上附加有分立的较强的发光谱线,因此适用于对具有较宽吸收谱带或吸收谱线分布的工作物质进行激励。由于激励光源的发光是空间各向分布的,因此需采用适当形式的聚光器装置,以使光源发出的光能尽可能多地进入到工作物质内部。

由于激光器的出现,提供了高亮度、高定向的光辐射,因此在原则上,亦可利用一种激光