

高等院校教材

激光应用技术基础

朱林泉 朱苏磊 编

国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

24
8
4

高等院校教材

激光应用技术基础

朱林泉 朱苏磊 编

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书由三部分组成。第一章讲述激光原理、激光器类型。第二章讲述激光应用技术,包括其在军事、医学、材料加工中的应用以及激光通信,在这一章中编者力求较好地反映当前国内外的技术现状。第三章和第四章分别讲述了与激光技术有关的应用光学知识和红外技术基础,希望这些内容有助于学生对激光系统工程设计技术的了解。

本书信息量较大,难度适中,适合于一般工科大学的专业课和选修课使用,也可用于相关专业的研究生和光电工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

激光应用技术基础/朱林泉,朱苏磊编. —北京:国防工业出版社,2004.8
高等院校教材
ISBN 7-118-03524-6

I. 激… II. ①朱…②朱… III. 激光技术 - 高等学校 - 教材 IV. TN24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 057086 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 7½ 168 千字

2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:11.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

激光作为信息的载体,体现了它作为光电技术的核心的作用。虽然它与红外、微光技术同为光电技术的基础,但在本质上有很大不同。激光具有更广泛的应用。

红外探测技术是将物体自然发射的红外光分布变成可见光分布,微光夜视技术是将星光、月光背景下的微弱光目标进行成像,从而弥补了人眼在空间、时间、能量和光谱等分辨能力上的局限性。激光不是一种自然光源,而是人类在认识自然、改造自然中创造发明的一种人造光源。它既为人类所发明,也就可在光谱、能量、空间性和时间性等各方面按人类意愿不断地创新和发展,以最大限度地满足人类对它的使用要求,因此激光不仅在民用上可用于测量、显示和通信技术,还可在军事上广泛应用于侦察、火控、制导、遥感、预警、宇航、训练模拟以及光电对抗等领域。

另外,激光作为能量的载体,已广泛应用于材料的加工、医学工程、激光美容、引雷驱雾、激光育种、激光核聚变和激光武器等领域。激光的应用已涉及国民经济各部门和人民的物质生活和精神生活,从这一意义上说,人类的活动都在有意或无意地与激光发生着密切的联系。

激光应用面如此之广,涉及领域涵盖了许多理工科专业,因此,介绍传播乃至研究发展激光技术是高等学校学科建设和教学任务中不可缺少的内容。

《激光应用技术基础》的内容有别于已有各类激光技术的教材。它信息量较大,难度适中,适合于一般工科大学的专业课和选修课使用。

本书编写过程中参考了一些优秀教材,如:安连生主编的《应用光学》、安毓英主编的《光学传感与测量》、余宽新主编的《激光原理与激光技术》、梁铨廷主编的《物理光学》,还参考了小原实等人的著作《应用激光光学》和集体译著的《红外系统原理》、关振中主编的《激光加工工艺手册》,以及一些论文。在此向上述专家学者致以真挚的谢意。限于学术水平和时间仓促的原因,书中不免存在缺点错误,诚恳地希望广大师生提出批评指正。

编 者

2004年8月

目 录

第一章 激光与激光器	1
1.1 激光器的产生与发展简史	1
1.2 激光的特性	2
1.3 激光辐射原理	3
1.3.1 跃迁和辐射	3
1.3.2 激光器的基本构成	5
1.3.3 激活粒子的能级系统	6
1.4 激光器的类型	7
1.4.1 气体激光器	7
1.4.2 固体激光器	11
1.4.3 染料激光器	13
1.4.4 半导体激光器	15
1.4.5 光纤激光器	21
1.5 He-Ne 激光器的稳频	25
1.6 调 Q 技术	26
第二章 激光应用技术	30
2.1 激光在军事技术中的应用	30
2.1.1 激光测距	30
2.1.2 激光雷达	34
2.1.3 激光制导	35
2.1.4 激光导航	36
2.1.5 激光武器	38
2.1.6 激光战术模拟	40
2.1.7 光电对抗	41
2.2 激光在医学中的应用	41
2.2.1 激光与生物体的相互作用	41
2.2.2 激光在治疗中的应用	45
2.2.3 激光在生物体检测及诊断中的应用	49
2.2.4 医用激光装置	54
2.3 激光通信	56
2.3.1 调制	56
2.3.2 传输	57

2.3.3	接收	58
2.3.4	多路通信	59
2.3.5	光通信的发展趋势	60
2.4	激光在材料加工中的应用	60
2.4.1	激光打孔、切割、焊接	61
2.4.2	激光法制备纳米粉材料	62
2.4.3	激光快速成型(Rapid Prototyping)	63
2.4.4	激光引雷、激光驱雾、激光核聚变	64
第三章	应用光学基础	66
3.1	几何光学的基本定律	66
3.2	光学聚焦元件	67
3.2.1	球面透镜	67
3.2.2	球面反射镜	75
3.2.3	非球面反射镜	76
3.2.4	非球面透镜	77
3.2.5	平场物镜—— $f\theta$ 透镜	78
3.3	影响聚焦元件成像质量的因素	79
3.3.1	衍射	80
3.3.2	像差	81
3.3.3	透镜焦距和孔径的优化设计	84
3.4	光纤光学系统	84
3.4.1	全反射光纤的光学性质	85
3.4.2	全反射光纤的应用	88
3.4.3	梯度折射率光纤	90
3.5	激光光学系统	91
3.5.1	激光束在均匀介质中的传播规律	91
3.5.2	高斯光束的透镜变换	94
3.6	介质的折射率与无穷远光源	95
第四章	红外技术基础	97
4.1	红外线的发现和红外技术的发展	97
4.2	红外线的频谱	98
4.3	红外光学材料	100
4.3.1	激光加工系统中的红外光学材料	103
4.3.2	红外材料性能	108
4.4	红外光学系统	110
4.4.1	红外光学系统的功能	111
4.4.2	红外光学系统的特点	111
4.4.3	典型红外光学系统	112

第一章 激光与激光器

1.1 激光器的产生与发展简史

激光在我国最初被称为“莱塞”,即英语“Laser”的译音,而“Laser”是“Light amplification by stimulated emission of radiation”的缩写,意思是“辐射的受激发射光放大”。20 世纪 60 年代初,根据钱学森院士的建议,“Laser”被改称为“激光”或“激光器”。

世界上第一台激光器是美国科学家梅曼(T. H. Maiman)于 1960 年研究成功的。此前,许多著名科学家的卓越研究成就已经成为激光理论的主要物理基础或激光器的主要技术基础。光与物质之间的共振相互作用是激光器发光的物理基础。1900 年普朗克提出量子化假设,成功地解释了黑体辐射的实验规律。1913 年玻尔又利用量子化假设成功地解释了氢(H)原子光谱的实验规律。在此基础上,爱因斯坦于 1917 年首次提出了受激辐射的概念。40 年后,这个概念在激光技术中得到了广泛的应用。

汤斯(C. Townes)和肖洛(A. Schawlow)对激光器谐振腔的结构作了卓有成效的研究。直到现在,即使激光器的种类已经很多,但汤斯和肖洛的构思仍为各类激光器的基本结构。有文献认为尽管世界上第一台激光器不是汤斯和肖洛研制出来的,但是他们所提出的基本概念和构想却被公认是对激光领域划时代的贡献。

在世界上第一台红宝石激光器问世不久,1960 年年底,工作在贝尔实验室的贾范(Javan)发明了世界上第一台氦氖(He-Ne)激光器,并且在影响下产生出一系列气体激光器。

此后,1962 年出现了半导体激光器;1964 年由帕特尔(C. Patel)发明了第一台二氧化碳(CO₂)激光器;1965 年发明了第一台 YAG(钇铝石榴石)激光器;1968 年开始发展高功率 CO₂ 激光器;1971 年出现了第一台商用 1kW CO₂ 激光器。高功率激光器的研制成功,为激光应用技术的迅速发展创造了必不可少的前提条件。

我国第一台固体红宝石激光装置是 1961 年在中国科学院长春光机所成功运行的;第一台气体激光装置(He-Ne 激光器)于 1963 年也是在长春光机所成功运行的。其后在该所相继建立了砷化镓半导体激光器、氟化钙激光器、钕玻璃激光器、转镜 Q 开关激光器等。

虽然在 1917 年爱因斯坦就预言了受激辐射的存在,但在一般热平衡情况下,物质的受激辐射总是被受激吸收所掩盖,未能在实验中观察到。直至 1960 年,第一台红宝石激光器才面世,它标志了激光技术的诞生。从此激光技术的发展十分迅速,现已在几百种工作物质中实现了光放大或制成了激光器。激光的出现是对传统光源的一次革命,它应用于工业、农业、军事、交通、科研以至日常生活等几乎所有的国民经济领域。它大大丰富了传统光学的内容,并发展形成了数门、乃至数十门新型的边缘科学。

1.2 激光的特性

概括地说,激光有四大特性:高亮度、高方向性、高单色性和高相干性。它们之间不是互相独立的,而是互有联系。激光所具有的上述优异特性是普通光源望尘莫及的。

1. 激光的高亮度

光源的亮度(B)定义为光源单位发光表面(S)沿给定方向上单位立体角(Ω)内发出的光功率(P)的大小,即

$$B = \frac{P}{S\Omega} \quad (1-1)$$

B 的单位为 $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。

普通光源所发出的光是连续的,并且在 4π 立体角内传播,能量十分分散,所以亮度不高,如:太阳光的亮度值约为 $2 \times 10^3 \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$,而气体激光器的亮度值为 $10^8 \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$,固体激光器的亮度更高,可达 $10^{11} \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。这是由于激光器的发光截面(S)和立体发散角(Ω)都很小,而其输出功率(P)都很大的缘故。

不仅如此,具有很高亮度的激光束经透镜聚焦后,能在焦点处产生数千度乃至上万度的高温,这就使其可能加工几乎所有的材料。

2. 激光的高方向性

激光的高方向性主要指其光束的发散角小。光束的立体发散角 Ω 为

$$\Omega = \theta^2 \approx \left(2.44 \frac{\lambda}{D} \right)^2 \quad (1-2)$$

式中 θ ——平面发散角;

λ ——波长;

D ——光束截面直径。

一般工业用高功率激光器输出光束的发散角为 mrad 量级。

激光束的发散角主要是由在激光器输出孔径处产生的衍射造成的,它还与振荡模式、腔长、工作物质等有关。基横模的发散角最小,横模的阶次越高,发散角越大。因此,适当的选横模技术,使激光器工作在基横模状态是有利于改善激光的方向性的。谐振腔越长,方向性越好。在各类激光器中,气体激光器的方向性最好,固体激光器次之,半导体激光器最差。

激光的高方向性使其能有效地传输较长的距离,同时还能保证聚焦后得到极高的功率密度。另外,高方向性可获得高的横向空间相干性。

M^2 是一个与发散角有关的可以作为光束质量有用度量的几何因子,它被定义为

$$M^2 = \pi \omega_0 \theta / \lambda \quad (1-3)$$

式中 ω_0 ——激光束的束腰半径;

θ ——平面发散角;

λ ——波长。

3. 激光的高单色性

单色性常用 $\Delta\nu/\nu$ 或 $\Delta\lambda/\lambda$ 来表征,其中 ν 和 λ 分别为辐射波的中心频率和波长, $\Delta\nu$

和 $\Delta\lambda$ 是谱线的宽度。原有单色性最好的光源是氩⁸⁶灯,其值为 10^{-6} 量级。而稳频激光器的输出单色性可达 $10^{-10} \sim 10^{-13}$ 量级,比原有单色性最好的氩⁸⁶高几万倍至几千万倍。

目前单色性能最好的激光器是单纵模稳频气体激光器,如 He-Ne 激光器,它的线宽可小至几个 Hz。激光器的单色性还与振荡模式及激光工作物质有关,多纵模激光器的单色性显然比单纵模激光器差,固体激光器的单色性比气体激光器差,单色性最差的激光器要属半导体激光器。使用选模技术和稳频技术对改善激光器的单色性能有重要意义。

激光的高单色性保证了光束经聚焦元件后能得到很小的焦斑尺寸,从而得到很高的功率密度。另外,高单色性可获得高的时间相干性。

4. 激光的高相干性

激光的相干性是在光的波动理论上描述光波各个部分的位相关系。由于激光中每个光子的运动状态(频率、相位、偏振态、传播方向)都相同,因此是极好的相干光源,它的相干性能比普通光源要强得多,一般称激光为相干光,普通光为非相干光。相干性有时间相干性与空间相干性之分,下面分别讨论激光的这两种相干性。

(1) 时间相干性,描述沿光束传播方向上各点的位相关系。光源的时间相干性(或称纵向空间相干性)与单色性相联系。光源的谱线宽度 $\Delta\nu$ 越窄,相干时间 t_c 就越长,相干长度也越长。相干长度 $L = c \cdot t_c = \frac{c}{\Delta\nu}$ 。激光的线宽非常窄,故它的时间相干性比普通光源好得多。红宝石激光的相干长度为 8 000mm,He-Ne 激光的相干长度为 1.5×10^{11} mm,而原有相干性最好的氩⁸⁶灯的相干长度仅为 800mm。

(2) 空间相干性,描述垂直于光束传播方向的波面上各点之间的位相关系,因此这里所讲的空间相干性,主要是指横向空间相干性,它与光源的方向性相联系。普通光源所发出的光分属众多的模式,只有在一定空间范围中的光子才是相干的。因此,可以使用相干面积来描述光的空间相干性,相干面积 $S = (\Delta\lambda/\theta)^2$ 。对于激光来说,只有属于同一个横模模式的光子才是空间相干的,不属于同一横模模式的光子则是不相干的。因此,激光的空间相干性由激光器的横模结构所决定。如果激光器是单横模,则它是完全空间相干的;如果激光器是多横模,则它的空间相干性能变差。此外,单基横模的方向性最好,横模阶次越高方向性越差。这表明激光的方向性越好,它的空间相干性程度就越高。

激光的相干性有很多重要应用,如使用激光干涉仪进行检测,比普通干涉仪速度快、精度高。用激光作为全息照相的光源,也是利用它的相干性能好这一特点。

1.3 激光辐射原理

1.3.1 跃迁和辐射

玻尔在解释 H 原子光谱实验规律时,将经典的理论与普朗克的能量量子化概念结合在一起,认为原子中的电子可以在一些特定的轨道上运动,处于定态,并具有一定的能量。因此,每种原子就有一系列的与不同定态对应的能级,各能级间的能量不连续。当原子从某一能级吸收了能量或释放了能量,变成另一能级时,就称它产生了跃迁。凡是吸收能量后从低能级到高能级的跃迁称为吸收跃迁,释放能量后从高能级到低能级的跃迁称辐射

跃迁。跃迁时所吸收或释放的能量一定等于发生跃迁的两个能级之间的能量差。如果吸收或辐射的能量都是光能,此关系可表示为

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad (1-4)$$

式中 E_2 、 E_1 ——分别是两个能级的能量;

$h\nu$ ——吸收或释放的光子的能量。

爱因斯坦从辐射与原子相互作用的量子论观点出发,提出这个相互作用包括原子的自发辐射跃迁、受激辐射跃迁和受激吸收跃迁三种过程。在激光器的发光过程中,始终伴随着这三个跃迁过程。下边分别叙述这三个跃迁过程。

1. 自发辐射

处于高能级 E_2 的原子自发地向低能级 E_1 跃迁,并发射出一个频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的光子的过程称为自发辐射跃迁。示意图如图 1-1 所示。

2. 受激吸收

处于低能级 E_1 上的一个原子在频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的辐射场作用下,吸收一个光子后向高能级 E_2 跃迁的过程称为受激吸收跃迁,如图 1-2 所示。

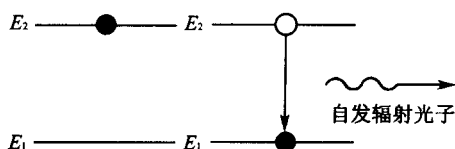


图 1-1 自发辐射跃迁

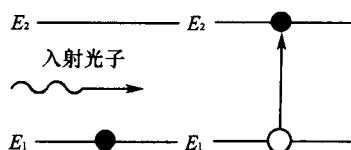


图 1-2 受激吸收跃迁

3. 受激辐射

处于高能级 E_2 上的原子在频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的辐射场激励作用下,或在频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的光子诱发下,向低能级 E_1 跃迁并辐射出一个与激励辐射场光子或诱发光子的状态(包括频率、运动方向、偏振方向、相位等)完全相同的光子的过程称为受激辐射跃迁,其示意图如图 1-3 所示。

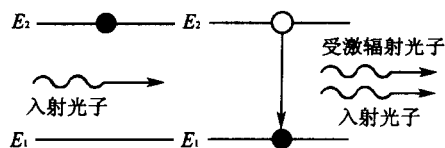


图 1-3 受激辐射跃迁

在受激辐射跃迁的过程中,一个诱发光子可以使处在上能级上的发光粒子产生一个与该光子状态完全相同的光子,这两个光子又可以去诱发其它发光粒子,产生更多状态相同的光子。这样,在一个入射光子的作用下,可引起大量发光粒子产生受激辐射,并产生大量运动状态相同的光子。这种现象称受激辐射光放大。由于受激辐射产生的光子都属于同一光子态,因此它们是相干的。通常,受激辐射与受激吸收两种跃迁过程是同时存在的,前者使光子数增加,后者使光子数减少。当一束光通过发光物质后,究竟是光强增大还是减弱,要看这两种跃迁过程哪个占优势。在正常条件下,即常温条件以及对发光物质

无激发的情况下,发光粒子处于下能级 E_1 的粒子数密度 n_1 大于处在上能级 E_2 的粒子数密度 n_2 。此时当有频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的一束光通过发光物质时,受激吸收将大于受激辐射,故光强减弱。如果采取诸如用光照、放电等方法从外界不断地向发光物质输入能量,把处在下能级的发光粒子激发到上能级上去,便可使上能级 E_2 的粒子数密度超过下能级 E_1 的粒子数密度,这种状态称为粒子数反转。只要使发光物质处在粒子数反转的状态,受激辐射就会大于受激吸收。当频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的光束通过发光物质,光强就会得到放大。这便是激光放大器的基本原理。即便没有入射光,只要发光物质中有一个频率合适的光子存在,便可像连锁反应一样,迅速产生大量相同光子态的光子,形成激光。这就是激光振荡器(简称激光器)的基本原理。因此可见,形成粒子数反转是产生激光或激光放大的必要条件,为了形成粒子数反转,须要对发光物质输入能量,这一过程称为激励、抽运或者是泵浦。

1.3.2 激光器的基本构成

通常的激光器都是由三部分组成的,即激光工作物质、泵浦源和光学谐振腔。下边分别讲述这三部分的结构及其作用。

1. 激光工作物质

为了形成稳定的激光,首先必须要有能够形成粒子数反转的发光粒子,称之为激活粒子。它们可以是分子、原子、离子或电子—空穴对。这些激活粒子有些可以独立存在,有些则必须依附于某些材料中。为激活粒子提供寄存场所的材料称为基质,它们可以是气体、固体或液体。基质与激活粒子统称为激光工作物质。

2. 泵浦源

为了形成粒子数反转,须要对激光工作物质进行激励,完成这一任务的是泵浦源。不同的激光工作物质往往采取不同的泵浦源。例如固体激光器一般是用普通光源如氙灯作泵浦源,对激光工作物质进行光照,又称光泵。对于气体激光工作物质,常常是将它们密封在细玻璃管内,两端加电压,通过放电的方法来进行激励,另外还有共振转移和化学反应两种激励方式。

3. 光学谐振腔

仅仅使激光工作物质处于粒子数反转状态,虽可获得激光,但它的寿命很短,强度也不会太高,并且光波模式多、方向性很差。这样的激光几乎没有什么实用价值。为了得到稳定持续、有一定功率的高质量激光输出,激光器还必须有一个光学谐振腔,它由放置在激光工作物质两边的两个反射镜组成,其中之一是全反射镜,另一个作为输出镜用,是部分反射、部分透射的半反射镜。光学谐振腔的作用主要有以下两个方面:

(1) 产生与维持激光振荡。光在粒子数反转的激光工作物质中传播时得到放大,由于有光学谐振腔的存在,一方面在它提供的光学正反馈作用下,腔内光子数因不断往返通过激光工作物质而被放大;另一方面由于谐振腔存在各种损耗(如输出损耗、衍射损耗、吸收与散射损耗等),腔内光子数又不断减少。当放大与减少互相抵消时,就可以形成稳定的光振荡,输出功率稳定的激光。

(2) 改善输出激光的质量。由于激光束的特性与谐振腔的结构有着不可分割的联系,因此可以通过改变腔参数的方法达到控制光束特性的目的,如提高激光的方向性、单

色性、输出功率等。

1.3.3 激活粒子的能级系统

产生激光的必要条件是实现粒子数反转,而为了实现粒子数反转就必须要有适合的能级系统的激活粒子。在这些激活粒子的能级系统中,首先必须有激光上能级和激光下能级,除此之外,往往还需有一些与产生激光有关的其他能级。常用激光器的激活粒子能级系统大致可分成两大类:三能级系统与四能级系统。现分别叙述如下。

1. 三能级系统

图 1-4 所示为两种三能级系统的示意图。其中图 1-4(a)中的 E_1 为基态,作为激光下能级,泵浦源将激活粒子从 E_1 能级抽运到 E_3 能级, E_3 能级的寿命很短,激活粒子很快地经非辐射跃迁方式到达 E_2 能级。非辐射跃迁,是指不发射光子的跃迁,它是通过释放其他形式的能量如热能而完成的。 E_2 能级的寿命比 E_3 长得多,称为亚稳态,并作为激光上能级。只要抽运速率达到一定程度,就可以实现 E_2 与 E_1 两个能级之间的粒子数反转,为受激辐射创造了条件。例如固体激光器中的红宝石激光器激活粒子——铬离子(Cr^{3+})就属于这类能级系统。图 1-4(b)中的 E_1 也是基态,但它不作为激光下能级,而是以 E_3 和 E_2 分别作为激光的上、下能级。在这种三能级系统里, E_3 的寿命比 E_2 长, E_2 能级在热平衡条件下基本上是空的。因此,只要抽运一些粒子到达 E_3 能级,就很容易实现粒子数反转,经受激辐射后到达 E_2 的粒子可迅速通过非辐射跃迁的方式回到基态 E_1 。例如气体激光器中的氩(Ar)离子激光器的激活粒子——氩离子(Ar^+)就属于此类能级系统。

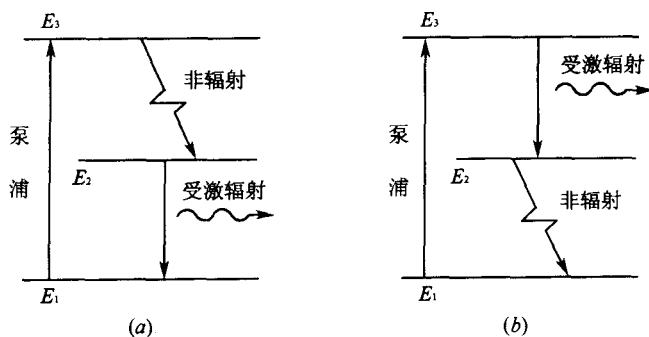


图 1-4 三能级系统

2. 四能级系统

图 1-5 所示为两种四能级系统的示意图,其中图 1-5(a)中的 E_1 是基态,泵浦源将激活粒子从基态抽运到 E_4 能级, E_4 能级的寿命很短,激活粒子立即通过非辐射跃迁的方式到达 E_3 能级。 E_3 能级的寿命较长,是亚稳态,作激光上能级用。 E_2 能级的寿命很短,热平衡时基本上是空的,作激光下能级用。 E_2 能级上的粒子主要也是通过非辐射跃迁的方式回到基态。这种能级系统也很容易实现粒子数反转。例如固体激光器中的钕玻璃激光器以及掺钕钇铝石榴石激光器(Nd:YAG)中的激活粒子——钕离子(Nd^{3+})便属于这类能级系统。图 1-5(b)中的 E_1 也是基态, E_4 和 E_3 分别为激光的上、下能级, E_2

能级是 E_3 与 E_1 之间的一个中间能级。 E_3 能级的寿命很短,当受激辐射的粒子由 E_4 能级到达 E_3 能级后,很快会通过非辐射跃迁的方式跳到 E_2 能级,并再通过非辐射跃迁的方式回到基态。只要泵浦源将基态粒子抽运到 E_4 能级,很容易就可以实现 E_4 与 E_3 能级间的粒子数反转。例如气体激光器中的 He-Ne 激光器的激活粒子——氖原子(Ne)与 CO_2 激光器中的激活粒子—— CO_2 分子都是属于这类四能级系统。

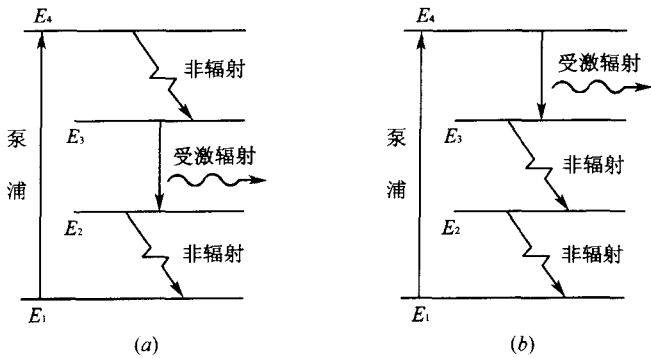


图 1-5 四能级系统

1.4 激光器的类型

根据工作物质的物相的不同,激光器可分为气体激光器、固体激光器和液体激光器。根据激活介质的粒子状态,激光器又可分为分子激光器、准分子激光器、原子激光器、离子激光器和半导体激光器。两种分类的交叉关系如图 1-6 所示。

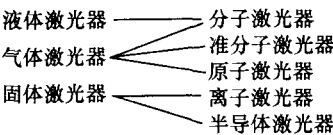


图 1-6 激光器的分类

1.4.1 气体激光器

气体激光器是目前种类最多、应用最广泛的一类激光器,它具有容易连续运转、相干性好、结构简单、造价低廉等优点。因此在国防建设与工农业各部门广泛地用作准直导向、计量基准、材料加工、以及作为全息照相、激光光谱学等的相干光源。

1. 一般结构

图 1-7 所示是气体激光器的三种典型结构。图 1-7(a)中组成光学谐振腔的两个反射镜紧贴在放电管的两端,称为内腔式;图 1-7(b)中组成光学谐振腔的两个反射镜与放电管完全分开装架,称为外腔式。在外腔式中,光从放电管 G 的端面射出再被反射到管内,需要经过窗表面四次。为了减少反射损失,使用了与光轴成一倾角的透明窗(称为布儒斯特窗),使得光在窗片上的入射角等于布儒斯特角(即外腔式)。这样,对于 TM 波

(电场方向与入射面平行,磁场与入射面垂直的波),其在端面不反射,犹如没有窗片一样,可以畅通无阻,在腔内形成稳定的振荡;而对于 TE 波(电场方向与入射面垂直的波),其在端面反射损失很大,不能形成振荡。因此从外腔式气体激光器射出的激光是电矢量与入射面平行的线偏振光。图 1-7(c)中谐振腔的两个镜片,一个紧贴放电管的一端,另一个与放电管分开装架,称为半外腔式。它产生的激光也是线偏振光。

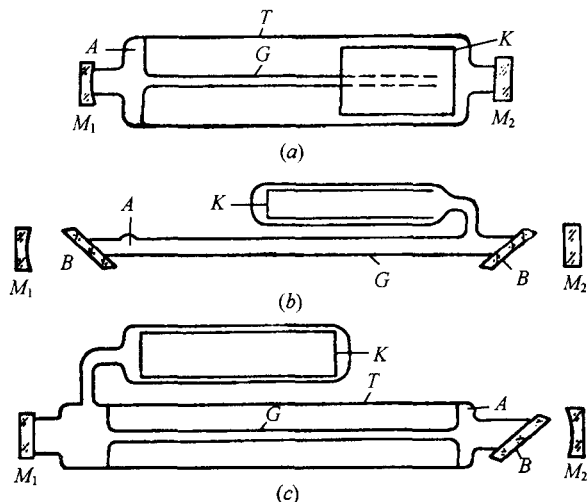


图 1-7 气体激光器的三种典型结构

M_1 —反射镜; M_2 —输出镜; A—阳极; K—阴极;
T—套管; G—放电管; B—布儒斯特窗。

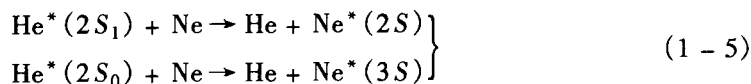
气体激光器一般采用放电激发,可以有如下几种方式:

- (1) 直流放电;
- (2) 交流放电;
- (3) 无电极的高频放电;
- (4) 高压脉冲。

前两种方法简单易行。如果激光器是用于外差式通信等用途,第一种方法比较有利。第二种方法只要将高压变压器的次级接到放电管的两个电极上即可。第三种方法目前以射频电源为主,具有可调制性好,输出功率稳定等优点。第四种方法用于高压脉冲激光器,当不能维持稳定的粒子数反转时,就必须采用这种方法。

2. He-Ne 激光器

图 1-8 是 He-Ne 激光器系统的能级图。从图中可以看到,Ne 原子的 $2S$ 能级和 $3S$ 能级的激发能同 He 原子的 $2S_1$ 能级和 $2S_0$ 能级差不多。在气体放电时,He 原子首先被激发到 $2S_1$ 能级与 $2S_0$ 能级。这两个能级是亚稳态,从它们到基态的辐射跃迁是被禁止的。处在这两个亚稳态的 He 原子与基态的 Ne 原子碰撞,将 Ne 原子激发,而 He 原子无辐射地回到基态,这就是所谓的共振转移。



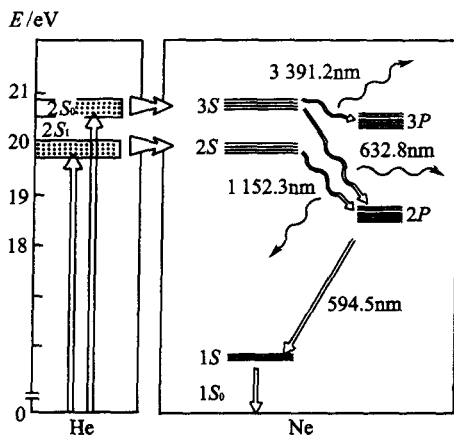


图 1-8 He-Ne 激光器系统的能级图

式中用“*”号表示激发态原子。在适当条件下,Ne 原子的 $3S$ 能级、 $2S$ 能级与 $3P$ 能级、 $2P$ 能级之间会出现粒子数反转,并发生受激辐射跃迁。在 $2P$ 能级与 $3P$ 能级上的 Ne 原子则通过自发跃迁很快地落到 $1S$ 能级,再通过跟管壁的碰撞,将能量交给管壁回到基态。这样一种抽空激光下能级的过程有助于维持稳定的反转状态。

在 He-Ne 激光中产生的激光谱线主要有三种,它们与 Ne 原子的下列跃迁相对应:

$3S \rightarrow 2P$	632.8nm
$2S \rightarrow 2P$	1152.3nm
$3S \rightarrow 3P$	3391.2nm

632.8nm 与 3391.2nm 跃迁具有共同的上能级,而且 3391.2nm 跃迁的增益比 632.8nm 高得多,它会大量消耗 $3S$ 能级上的 Ne 原子,这对 632.8nm 的激光是不利的。为了提高 632.8nm 的输出功率,必须抑制 3391.2nm 的激光。最常用的方法是使激光器谐振腔的反射镜只对 632.8nm 有高反射率,而对 3391.2nm 反射率很低。另一个方法是沿放电管放置许多磁铁(如图 1-9 所示),产生一个不均匀的轴向磁场。磁场使 632.8nm 和 3391.2nm 两条谱线分裂为频率相差很小的两种谱线(这称为塞曼效应)。由于磁场是不均匀的,放电管中有些地方磁场强,有些地方磁场弱,因此有的地方谱线分裂得大,有的地方分裂得小,这相当于把谱线加宽了。而增益反比于线宽,谱线加宽就使增益下降。632.8nm 的多普勒宽度约为 3391.2nm 的 5 倍,所以磁场造成的谱线加宽,对 632.8nm 来说因其谱线本来就很宽影响不大,而对 3391.2nm 影响很大,这就有效地降低了 3391.2nm 的增益,抑制了 3391.2nm 的激光。

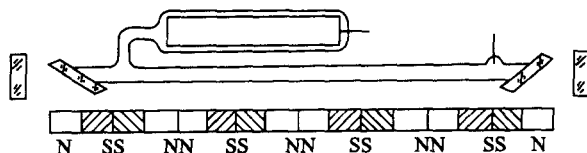


图 1-9 利用磁铁抑制 He-Ne 激光器 3391.2nm 的激光

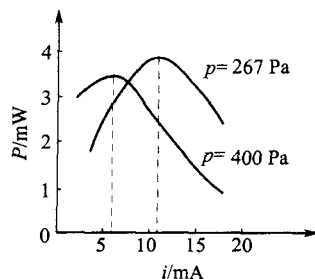
He-Ne 激光器的输出功率约在 $1\text{mW} \sim 100\text{mW}$ 的范围。最常见的长度为 250mm 的 He-Ne 激光器的输出功率为 1.5mW , 直流放电电压为 1500V , 放电电流为 5mA , 输入功率为 7.5W , 效率为 0.02% 。He-Ne 激光器的输出功率与放电条件有很大关系, 下面分几点加以说明。

(1) 在一定的气体配比下, 存在一个使输出功率达到最大的最佳充气气压。实验表明, 最佳充气气压 p 与管径 a 的乘积近似地是一个常数

$$p \cdot a = 480\text{Pa} \cdot \text{mm} \quad (1-6)$$

(2) 输出功率随气体配比的变化不太明显。随着放电管管径的增大, 最佳气体配比略有下降。当管径 $a = 1.5\text{mm}$ 时, 充气配比 He:Ne 取 7:1 最好; 当 $a = 8\text{mm}$ 时, 取 4:1 最好。

(3) 输出功率随放电电流的变化如图 1-10 的曲线所示。可见, 最佳放电电流随充气气压的降低而升高。



3. 其他气体激光器

在单种气体或气体混合物中的放电已经产生大量的激光谱线, 它们的波长从远红外一直延伸到紫外。表 1-1 总结了一些常见的气体激光器及其主要谱线。全部惰性气体 (氦(He)、氖(Ne)、氩(Ar)、氪(Kr)、氙(Xe)、氡(Rn)) 能在单种气体中产生激光跃迁。例如, 氩离子激光器, 在可见波段的蓝区产生若干种波长的激光, 在连续工作条件下功率可达 500W 。在锌(Zn)、镉(Cd)、水银(Hg)、铅(Pb)、锡(Sn)、铜(Cu)等金属蒸气中的脉冲放电也已用来产生激光。卤素如氯(Cl)、溴(Br)、碘(I)等同样能在脉冲条件下产生激光跃迁。在分子气体中的放电可以在分子能级之间产生粒子数反转, 最有代表性的是氮分子激光器(在红外与紫外区)与 CO_2 激光器(波长在 $10\mu\text{m}$ 左右)。特别是 CO_2 激光器, 近年来进展很快, 为大功率高效率激光器开辟了新的途径。目前 CO_2 激光器的连续输出功率已达 100kW , 是所有激光器中最高的, 脉冲输出的峰值功率可达太瓦(10^{12}W)量级。

表 1-1 常用气体激光器的波长

气体种类	激活介质 ^①	主要激光波长/ μm	备 注
He-Ne	Ne	0.632 8, 1.15, 3.39	连续
Ne	Ne	0.540 1, 0.614 3, 1.15	脉冲、高增益
Ne	Ne^+	0.332 3, 0.337 8, 0.339 2	连续或脉冲
Ar	Ar^+	0.476 5, 0.488 0, 0.514 5	连续或脉冲
Kr	Kr^+	0.530 8, 0.550 9, 0.586 3, 0.647 1	连续或脉冲
Xe-He	Xe	3.507, 5.574	连续、高增益
Xe	Xe^+	0.460 3, 0.541 9, 0.597 1	连续或脉冲
Ne-O_2 , Ar-O_2	O	0.844 6	连续
N_2	N_2	0.337 1	脉冲、高增益
空气, N_2	N^+	0.567 9	脉冲
He-Cd	Cd^+	0.325 0, 0.441 6	连续、高效率

(续)

气体种类	激活介质 ^①	主要激光波长/ μm	备 注
$\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$	CO_2	10.6	连续或脉冲,高功率与高效率
H_2	H_2	0.12, 0.17	第一个真空紫外激光器
H_2O	H_2O	27.9, 118.6	长波长
$\text{CH}_3\text{CN-NH}_3$ (乙腈-氨)	HCN (氰化氢)	337	波长更长

注:① 激活介质指产生激光跃迁的介质。

1.4.2 固体激光器

1. 一般结构

固体激光器中,起受激辐射作用的激活离子镶嵌在晶体或玻璃之类的固体基质中。激活离子的密度约为 10^{19} 个/ $\text{cm}^3 \sim 10^{22}$ 个/ cm^3 , 比气体工作物质的粒子密度大得多。作为基质的晶体或玻璃通常做成棒状,两端面抛光成光学平面,并具有很好的平行度。在两端面镀上反射膜,就可以构成谐振腔。也可以另外用两个反射镜构成谐振腔。

固体激光器一般采用光泵抽运。作光泵用的光源通常是氙灯或高压水银灯,可以是连续发光的或脉冲式发光的。

图 1-11 所示为固体激光器的两种典型结构。在图 1-11(a) 中,激光棒 L 放在螺旋状灯 X 的里面,棒的端面镀有反射膜。这样,整个激光器既紧凑又简单。图 1-11(b) 是一种比较复杂的系统。激光棒 L 放在椭圆柱面镜 K 的一条焦线上,作光泵用的氙灯 X 放在另一条焦线上。谐振腔的两个反射镜 M_1 、 M_2 与激光棒分开装架。

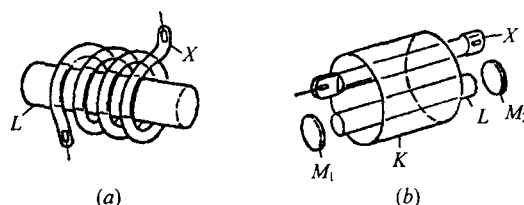


图 1-11 用光泵抽运的固体激光器的两种典型结构

2. 红宝石激光器

红宝石激光棒由掺有 0.05% (按重量计) 的 Cr_2O_3 的人造白宝石 (Al_2O_3) 单晶制成。 Cr^{3+} 的密度约为 1.6×10^{19} 个/ cm^3 。在光学上,它属于单轴晶体, $n_0 = 1.746$, $n_e = 1.756$ 。由于晶体中的 Al^{3+} 离子被 Cr^{3+} 离子所取代,对蓝光与绿光有吸收作用,使棒呈粉红色,故有红宝石之称。我国在 1958 年第一次制成了优质的红宝石晶体,并在这个基础上于 1961 年制成了第一台红宝石激光器。

在红宝石中,激活离子是 Cr^{3+} 离子。 Cr^{3+} 离子的能级如图 1-12 所示。在激光器运转时, Cr^{3+} 离子吸收了外来光从基态 4A 跃迁到激发态 4T_1 或 4T_2 , 这对应于红宝石中 Cr^{3+} 离子的吸收光谱(图 1-13)的蓝区和绿区的吸收峰。 4T_1 或 4T_2 两能级很宽,每一个