

激
光
测
距
仪

激光测距仪

版
社

激光测距仪



激 光 测 距 仪

中国矿业学院矿山测量教研室编

煤 炭 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书共十一章及三个附录。前五章讲激光测距的基本原理，较系统地介绍了载波和调制光波的产生、发射、接收以及相位法测距原理的有关问题。在六、七章中，运用测距基本原理对几种测距仪的主要结构及工作过程作了简要说明。八、九章介绍了其它激光测距法。十一章介绍了激光在矿山测量和大地测量中的一些其他应用。第十章为激光测距仪的误差来源及检测方法。附录中介绍了激光测距仪的发展趋势及蓄电池的使用和维护知识。

本书可作为煤炭工业系统高等院校测量专业激光测距课程的教科书，也可供测绘工作者及从事研制和生产激光测距仪的技术人员和工人参考。

激 光 测 距 仪

中国矿业学院矿山测量教研室编

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本787×1092¹/₁₆， 印张20⁷/₈，

字数 497 千字 印数8,701—11,200

1980年2月第1版 1982年4月第2次印刷

书号15035·2259 定价2.15元

前 言

随着激光技术和电子技术的飞速发展,近十年来,国内外长、中、短程光电测距仪(主要是激光和半导体红外测距仪)的研制和生产工作进展异常迅速。激光测距仪操作简单,使用方便,在国防、科研和冶金、矿山、建筑、水电、铁路、交通等部门都得到了日益广泛的应用。由于它是光、电、机相组合的仪器,结构原理比较复杂。为使测绘工作者了解这类仪器的基本结构原理、工作过程以及影响仪器性能的因素等方面的知识,以便正确合理地使用和维护仪器,我们编写了此书。

由于目前国内外激光测距仪(包括半导体红外测距仪)型号繁多,具体结构各不相同,所以,我们在本书的前五章中,对测距仪的一些共同性的基本器件(如激光器、光探测器、调制器以及光学系统等)、测距原理、信息转换以及基本功能电路等内容进行了系统的介绍。在此基础上,对几种激光测距仪(以国内仪器为主)作了简单而系统的剖析,以加深对仪器的基本测距原理和工作过程的理解。对于测绘工作者所关心的测距仪的误差来源及精度检测(常用的)方法,也进行了分析、讨论与具体介绍。此外,还简要地介绍了其它激光测距原理(如超高频及多波相位测距原理及脉冲、人卫测距等)和激光测量仪器(如激光准直仪、激光水准仪及激光经纬仪等),以便帮助大家了解激光在矿山测量和大地测量中应用的概况。

本书由郭达志、周丙申同志执笔。在调查研究和编写过程中,得到了北京大学物理系、清华大学建筑系、北京光学仪器厂、北京测绘仪器厂、铁道部铁道科学研究院、国家测绘总局测绘研究所、武汉地震大队、国营向阳仪器厂、同济大学、北京市地质地形勘测处、中国人民解放军测绘学院及总字57659部队等单位的大力帮助。林福亨、田伯健、何汉启、仲跻旺、李学正、储钟瑞、刘翰生、骆一鸣及徐肇治等同志分别对该书稿的各部分进行了审阅并提出了修改意见。在此表示衷心感谢。

书中谬误与不当之处欢迎读者批评指正。

中国矿业学院矿山测量教研室

1978年8月

目 录

绪 论	1
第 一 章 激光及激光器	3
§ 1-1 激光及其产生	3
§ 1-2 激光的特性	5
§ 1-3 固体激光器	6
§ 1-4 气体激光器	9
§ 1-5 半导体激光器和发光二极管	12
§ 1-6 激光测量仪器对激光器的选择	16
第 二 章 激光的调制及调制器	18
§ 2-1 概述	18
§ 2-2 调制器	18
§ 2-3 Q 调制技术	27
§ 2-4 锁模技术简介	32
第 三 章 光探测器	38
§ 3-1 光探测器的工作机理	38
§ 3-2 光探测器简介	38
第 四 章 激光发射和接收的几个问题	43
§ 4-1 仪器的光学系统	43
§ 4-2 几种其他光学元件	50
§ 4-3 激光的大气传输和测距仪的测程	56
第 五 章 相位法光电测距仪的工作原理	64
§ 5-1 相位法测距的原理	64
§ 5-2 测量相位的方法	71
§ 5-3 相位-距离信息的转换及处理	92
§ 5-4 斜距的改正和换算	101
第 六 章 短程光电测距仪	116
§ 6-1 概述	116
§ 6-2 HGC-1型半导体红外测距仪	117
§ 6-3 长征DCH-1型红外测距仪	142
§ 6-4 瑞士WILD DI-3型电子归算红外测距仪	155
第 七 章 长中程气体激光测距仪	176
§ 7-1 概述	176
§ 7-2 DCS-1型激光测距仪	175
§ 7-3 JCY-2型激光测距仪	191
§ 7-4 HQ-102型激光测距仪	197
§ 7-5 DCX-30 (DC-30JG) 型激光测距仪	203

§ 7-6	AGA-8型激光测距仪	215
第八章	超高频及多波相位测距原理	220
§ 8-1	超高频调制激光测距原理	220
§ 8-2	双色及双色-微波相位测距原理	222
第九章	脉冲及其他测距方法	230
§ 9-1	脉冲激光测距	230
§ 9-2	激光地形测绘仪	232
§ 9-3	AJG75-1型激光无标尺地形仪	245
§ 9-4	人造卫星激光测距	249
§ 9-5	脉冲-相位法激光测距	251
§ 9-6	其他激光测距方法	254
第十章	光电测距仪的误差和检测	260
§ 10-1	光电测距仪的误差	260
§ 10-2	光电测距仪的精度检测	270
第十一章	其他激光测量仪器	290
§ 11-1	激光准直仪和激光投点仪	290
§ 11-2	激光经纬仪	301
§ 11-3	激光水准仪	304
§ 11-4	测量地表和建筑物变形或移动的激光方法	305
§ 11-5	激光陀螺仪的基本原理	306
附录一	激光测距的发展趋势	312
附录二	国内外主要光电测距仪技术参数一览表	318
附录三	蓄电池的使用和维护	321
主要参考资料		327

绪 论

电磁波包括光波和无线电波。电磁波测距（旧称“物理测距”）已有三十多年的历史。第二次世界大战后开始应用于测量领域，最初是雷达，主要是空中目标定位或空中测距，四十年代末开始应用于地面测量，并由瑞典首先研制成功光电测距仪和微波测距仪。

电磁波测距的基本工作原理较简单，目前主要有脉冲法和相位法测距两种。其共同点是通过直接或间接地测定电磁波在被测距离上往返所需的时间 t_{2D} ，按下式来计算距离：

$$D = \frac{C}{2} t_{2D}$$

式中 C 是电磁波在空气中传播的速度。

目前，用脉冲法直接测定时间间隔 t_{2D} 来测距所能达到的精度较低，一般为1~5米。高精度测距基本上采用相位法，即测定调制光信号或电信号经过所测距离 D 而产生的相位移 Φ 来间接推算信号传播的时间 t_{2D} ，从而求得所测距离。

因为

$$t_{2D} = \frac{\Phi}{\omega} = \frac{\Phi}{2\pi f}$$

所以

$$D = \frac{C}{2} \cdot \frac{\Phi}{2\pi f} = \frac{C}{4\pi f} \Phi$$

式中 f 是信号的调制频率。

微波测距仪是用微波段的无线电波作载波。这种测距仪对大气的能见度没有要求，可以全天候观测。但受气象因素和地面反射的影响较大，因而精度较低，且不够稳定。

光电测距仪则是以光波作载波。六十年代以前均采用普通光源的可见光波作为光电测距仪的载波。这种测距仪要求大气的能见度较高，白天作业困难。

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。它的出现，标志着人们掌握和利用光波进入一个新阶段。激光技术出现之后，很快被应用到各类测量（大地测量、地形测量、工程测量、航空摄影测量，以及人造地球卫星的观测和月球的光学定位等航天测量）中，使测量方法不断革新，测量精度显著提高，引起了测量领域内的深刻变化。激光测距是其中应用最早且最为成熟的一种。世界上第一台红宝石激光器于一九六〇年问世，第二年就有了激光测距的实验报导。此后，各类激光测距仪或红外光测距仪发展很快。据不完全统计，各种型号的测距仪已近百种之多，绝对测距精度已达0.1毫米量级，并且仪器不断向自动化、数字化和小型轻便化方向发展，大大地减轻了测量人员的劳动强度，加快了作业速度。此外，其他激光测量仪器也相继出现，如激光准直仪、激光水准仪、激光经纬仪等。它们在大地测量和各种工程测量中得到推广应用，深受广大测量人员的欢迎。

目前，在短程光电测距仪中广泛采用砷化镓（GaAs）发光二极管作光源（红外光），从广义来说，它属于非相干态激光，所以，也可将这种红外测距仪包括在激光测距仪之列。

激光测距仪按测距方法可分为：脉冲法测距仪；相位法测距仪；脉冲-相位法测距仪；

干涉法测距仪等。

按测程来分，大体上可分为三类：

短程激光测距仪：测程在 5 公里以内，适用于低等控制测量及各种工程测量；

中程或中长程激光测距仪：测程从 5 公里~几十公里。适用于大地控制测量、地震预报观测等；

远程及超远程激光测距仪：用于导弹、人造地球卫星、月球等空间目标的距离测量。

激光测距仪是光学、激光技术、精密机械、电子学、计算技术及光电子学等多种技术的综合应用。随着激光技术、电子技术、计算技术和集成光学的发展，激光测距仪正朝着数字化、自动化、小型轻便化方向发展。不少仪器还配备了小型专用电子计算机，提高了工作效率和测距精度，加快了测量速度。

我国激光测距仪的研制和应用近几年来取得了可喜的成绩。一九六九年武汉地震大队等单位研制成功 JCY-1 型激光测距仪。一九七四年以来又研制并生产了 JCY-2 型激光测距仪。一九七五年北京光学仪器厂等单位研制成功 DCX-30 (DC-30JG) 型激光测距仪。一九七七年 238 厂又研制成功 HQ-102 型激光测距仪。这些仪器可应用于大地控制测量、地震预报等方面。以砷化镓半导体发光二极管为光源的自动数字显示光电测距仪 HGC-1 型于一九七五年研制成功，近年来已由北京测绘仪器厂小批量生产。一九七七年北京大学等单位又研制成功长征 DCH-1 型等短程光电测距仪。这些仪器可应用于各种工程测量、低等控制测量、地形测量等工作。以氦氖气体激光器作光源的中程自动数字显示激光测距仪 DCS-1 型，于一九七八年在上海研制成功。激光地形测绘仪、人造卫星激光测距仪以及用于其他目的的各种激光测距仪也相继研制成功，并投入使用。此外，激光准直仪、激光经纬仪、激光水准仪等也不断得到推广应用。

随着我国社会主义四个现代化水平的不断提高，激光技术必将在测绘领域中得到更加广泛的应用。

第一章 激光及激光器

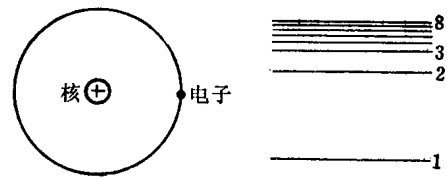
§ 1-1 激光及其产生

一、自发辐射的物理基础

光波是指从远红外光区到紫外光区的电磁波。在这个电磁波谱区中，除了太阳和天体的辐射外，还有许多种人工辐射源，包括：热源；气体放电源——电流通过气体或金属蒸气时产生的发光现象，如低压水银灯、氖气灯等；混合型源——同时伴有热辐射和发光，如高压水银灯或弧光灯等。所有这些物体的发光都是由于构成这些物体的分子或原子的转动和振动跃迁，使分子或原子微观系统的状态发生变化而产生的。这是和产生射频无线电波根本不同的地方。而分子或原子的振动或转动辐射出电磁波，这是两者的共同本质。由于各种物质的分子和原子结构千差万别，所以辐射波长可以从远红外光区直到紫外光区，其频段比射频宽广得多。

要了解自发辐射产生的过程，必须对物质的结构有一些最基本的认识。大家知道，物质是由分子和原子构成的，而原子又是由原子核和围绕核旋转的一群电子组成的一个微观系统。由量子力学知道，处于每个壳层上的电子数是一定的，每层上的电子数可用 $2n^2$ 来表示， n 是由里往外数的壳层序数。在没有外界作用的情况下，里层的电子不会跑到外层上去。最外层被电子占满时，该原子就是稳定的。例如氦，它有两个电子， $n = 1$ ，即只有一个壳层，电子数等于 $2 \times 1^2 = 2$ ，说明壳层已被填满，所以氦是惰性气体。氢原子也只有一个电子壳层，但只有一个电子， $n = 1$ ，没有被填满，所以是活泼气体(图 1-1 a)。原子最外层的电子数不能超过 8 个。这 8 个电子从 1 至 8 表示了元素的物理和化学性质的变化规律。这就是元素周期表分成 8 个周期的原因。

电子围绕原子核不停地运动，因而具有动能。原子核与电子之间由于极性相反而相互吸引，使电子带有位能。电子的动能和位能之和叫做原子的内能。各种物质的原子的内能分布不是连续变化的，而是呈台阶式变化的。电子愈靠近原子核，原子的内能差别就愈大。通常是用若干水平线来表示电子所处的能量值，这就是原子的能级图(图 1-1 b)。



a、氢原子模型 b、氢原子的能级

图 1-1

能级图中最低的一条水平线位置是原子的最低能级，称基态(或稳态)，其他各能级叫做高能态或激发态。

在通常情况下，原子的绝大多数处于基态，只有极少数的一些原子其外层电子跑到更外层的轨道上去，使该原子处于激发态。例如，红宝石在室温(300°K)下，处于基态的铬离子数为激发态铬离子数的 10^{30} 倍。即使在 3000°K[●]时，基态铬离子也比激发态多 1000

● K为绝对温度符号。

倍。但是，由于外界作用基态原子吸收外界能量之后，可从基态变为激发态。例如，红宝石激光器是用脉冲氙灯照射，将铬离子激发到高能级上去。氦氖激光器是用电子与原子碰撞，使氦和氖原子激发到高能级上去；半导体激光器则可用电激励的方法，将电子激发到导带中去。

由于原子内部结构不同，在相同的外界条件下各种原子从基态激发到各个高能级上去的可能性是不一样的，也就是说有一定的几率。原子激发到激发态以后，能量增加，处于不稳定状态，它有自发地返回到基态的趋势。这一过程叫做自发跃迁。自发跃迁时，原子从高能态回到低能态，内能降低，多余的能量便释放出来。释放的能量有两种形式：一种是热，这种跃迁叫无辐射跃迁；另一种是光，这种跃迁叫自发辐射跃迁，其辐射称自发辐射。辐射出来的光子的频率由发生跃迁的两个能级间的能量差所决定(图 1-2)。例如从能级 E_2 向能级 E_1 跃迁时所辐射出来的光子的频率

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (1-1)$$

式中 h ——普朗克常数。

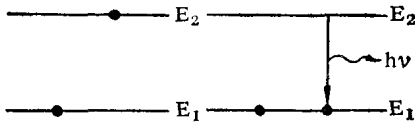


图 1-2 自发辐射跃迁

因为辐射工作物质可能包含许多种类的元素，各种元素的原子的最外层电子的相位不同，电子轨道半径也不一样，因此由这样的工作物质所辐射的电磁波中，各个模式的强度、频率、相位和方向可能是千差万别的。

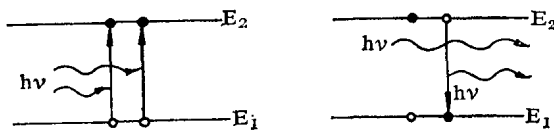
所以自发辐射在光学上叫做非相干光，例如白光灯、电灯、碳棒和高压脉冲灯等的辐射都是非相干光。

自发辐射的能量分布在十分宽广的频谱区域内，借助滤光器也不可能获得很好的单色光。同时辐射方向呈球面分布(没有方向性)，借助反射装置或透镜难以获得发散角很小、即十分准直的光束，也难以借助透镜成像装置来最大限度地增强亮度。

二、激光的产生

(一) 光的受激吸收和受激辐射

除了自发辐射之外，原子还有受激辐射现象。当外来光子的能量恰好等于两相应能级间的能量差时，基态原子才能吸收外来光子的能量，从低能级 E_1 跃迁到高能级 E_2 上去，这种过程称为受激吸收(图 1-3 a)。它的相反过程是，处于高能级的原子受到入射光子的作用，当该光子的能量恰好等于其两相应能级的能量差时，受激原子将发生由高能态向低能态的跃迁，这种跃迁称为受激跃迁，其辐射称为受激辐射(图 1-3 b)。



a、受激吸收

b、受激辐射

图 1-3 受激吸收和受激辐射

受激辐射产生的光子与入射光子的传播方向、频率、振动方向、相位完全一样。

(二) 粒子数反转分布

受激辐射跃迁是产生激光的必要条件，但还不是充分条件。可以想象，如果让受激辐射光子一个一个地发射出来，那是没有什么益处的。下面我们进一步叙述激光是如何产生的。

一般而言,原子激发到高能态后在高能态上所停留的时间是极其短暂的,通常仅为 10^{-8} 秒左右。该停留时间称为原子处在该能级的平均寿命,并用 τ 表示。原子、分子和离子的内部结构不同, τ 值也不一样。例如红宝石中的铬离子,处在能级 E_3 上的寿命很短,只有 10^{-9} 秒左右。而在能级 E_2 上的寿命却很长,约几毫秒,仅次于基态。所以能级 E_2 称为亚稳能级,处在 E_2 上的原子状态称为亚稳态。要形成激光,工作物质必须具有亚稳能级。许多元素,诸如氢原子、氦原子、氩离子、铬离子、二氧化碳分子等等,都有这种亚稳能级存在,是良好的激光材料。

在入射光子的作用下,基态原子跃迁到高能态的受激吸收过程和高能态原子跃迁回基态的受激辐射过程是同时存在的,相互对立的过程。在常温下,基态原子比激发态原子多得多,即受激吸收占主导地位。如果选择适当的激励方式去激励激光材料,可以使高能态的原子数目多于低能态的原子数目,即把正常的原子分布状态翻转过来,这种原子的分布状态称为按能级的反分布状态,简称“粒子数反转分布”或“粒子数反转”。例如,用脉冲氙灯照射红宝石,使受激吸收发生在 $E_1 \sim E_3$ 之间。因激发到 E_3 上的铬离子的平均寿命很短,很快就转到 E_2 上去,而 E_2 的寿命很长,这样就可能使处于 E_2 上的铬离子数越来越多,以至达到 E_2 上的铬离子数比 E_1 上的还多,即实现了粒子数反转分布。

实现粒子数反转的方法很多,如用光照、气体放电、化学反应等来对基态原子进行激励。这种激励方式与水泵将低处的水抽往高处的原理相似,所以人们把各种对基态原子的激励手段又叫做泵浦或抽运。用强光进行激励时叫光泵浦,而激励光则叫泵浦光。

(三) 激光谐振腔

激光谐振腔由两块相互平行的反射镜组成,其中一块为全反射镜,另一块为部分反射镜(图1-4)。实现了粒子数反转分布的工作物质通称增益介质。将工作物质放在谐振腔中,从增益介质中辐射出来的光子刚开始时其辐射方向是杂乱无章的,其中不与谐振腔轴线平行的自发光子被反射出谐振腔之外,而与谐振腔轴线平行的自发光子,经谐振腔反射镜反射之后沿轴线反复运动。这种沿谐振腔轴线反复运动的光子不断激励高能态原子使之产生受激辐射。如此往复,沿着谐振腔轴线方向的受激辐射光子将愈来愈多。如果这种光子在腔内来回反射一次所产生的增益,足以补偿工作物质和谐振腔造成的损耗时,才能有净放大作用。当放大到光足够强时,便从部分反射镜一端输出一部分光,这就是激光,也即受激辐射光。

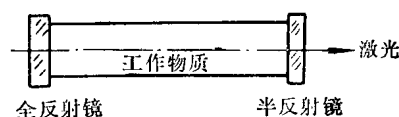


图 1-4 激光谐振腔

产生激光时,增益介质的单位体积内高能级的粒子数与低能级数之差,叫做阈值反转密度。而外来激励使工作物质开始产生受激辐射的能量、功率或电流,分别称为阈值能量、阈值功率或阈值电流。

综上所述,要产生激光,首先必须利用激励能源使激光工作物质实现粒子数反转分布,这是产生激光的前提条件。但这还不够,还必须满足阈值条件,这是产生激光的决定性条件。这两个条件缺一不可。

§ 1-2 激光的特性

激光与普通光都是一种电磁波,但它又具有普通光所不能比拟的特性:

1. 高度相干性

相干波是指两个具有相同方向、相同频率和相同相位（严格地说是指相位差相同）的波。普通光源是自发辐射光，是非相干光。激光是受激辐射光，输出激光光子的相位与入射光子相同，因此具有高度的相干性。就相干性来说，只有激光出现之后，才第一次找到了理想的相干光源。

2. 高度单色性

普通光源包含着多种波长，因而包含了多种颜色的光，例如日光从红光到紫光全包含了，其相应波长从7600~3800埃。激光频率是由亚稳态能级与基态能级之差决定的，单色性极高，例如氦氖激光的谱线宽度仅一千万分之一埃。

3. 方向性强

普通光源向四面八方发光，而从激光器的部分反射镜一端射出的激光基本是沿着与镜面垂直的方向传播的，其发散角很小，仅为最好探照灯的几百分之一，一般在几个毫弧度之内。如配置适当的光学准直系统之后，发散角可达 10^{-4} 弧度以上，几乎是一束平行光束。

4. 亮度高

由于激光束极窄，带来了有效功率和照度特别高。一台水平较高的红宝石巨脉冲激光器，其亮度可达10亿兆瓦/厘米²·立体角，比高压脉冲氙灯的亮度高37亿倍，比太阳表面亮度高200亿倍以上。

激光的上述特性，使激光具有广阔的应用前景。例如，工业上的激光打孔、切割、焊接、准直、测距；农业上用激光辐射改良种子、改变遗传物性；医学上的激光焊接视网膜和激光“光刀”；精密测量上用激光作长度基准和光频标准，测量地球形变和大陆漂移等；国防建设上的激光测距、激光雷达、激光通讯、激光制导、激光武器。还可用激光进行全息照相。在科学实验方面，由于激光极大地提高了时间、空间和光谱测量的分辨率，因而必将进一步扩展人们对微观世界的认识和利用。

自从一九六〇年第一个红宝石激光器出现以来，所获得的各种激光谱线已达数万条以上，分布于远红外光区到紫外光区的整个光谱区上。激光器是利用受激辐射现象来产生激光的装置。激光器通常是由激光工作物质、光学谐振腔和激励能源组成的。激光工作物质品种繁多，工作原理和方法也不尽相同，一般可分为固体激光器、气体激光器、半导体激光器、液体激光器和化学激光器等。按工作方式可分为稳定态激光器和脉冲激光器。通常使用的连续激光器属于稳定态激光器。由于激光的应用很广，不同的应用场合有不同的要求，这里不准备全面叙述各类激光器的原理特性，仅就目前在激光测量仪器上常用的几种激光器作些简单介绍。

§ 1-3 固 体 激 光 器

固体激光器的工作物质多为晶体和玻璃等，目前真正具有使用价值的主要有红宝石、掺钕钇铝石榴石(Nd³⁺:YAG)和钽玻璃三种。与其他激光器比较，固体激光器具有坚固、参与激射作用的离子密度大、瞬时功率高等特点，而其稳定性和相干性则不如气体激光器，能量转换效率也较低。

目前，固体激光器的工作方式大体上有：

1. 单脉冲式：激励光源和激光发射均为单次脉冲。
2. 重复脉冲式：激励光源和激光发射都采取一定重复频率的脉冲方式工作，其重复频率可以从每秒一次到几十次，甚至几百次。也有采用连续的激励光源，而用特殊的开关对激光进行调制，使重复频率达每秒几千次，通称高频脉冲式。
3. 连续方式：用连续光源激励工作物质，激光发射也是连续的。目前只有 YAG 激光器在常温水冷条件下可实现连续工作。
4. 调 Q 脉冲式：在重复脉冲式的器件中加上调 Q 元件，把发射的激光脉冲压缩到毫微秒数量级，从而获得高峰值功率的激光脉冲。目前可获得脉宽为毫微秒量级，峰值功率为 $10^6 \sim 10^9$ 瓦的脉冲激光。无标尺激光地形仪的激光器就是采用这种工作方式。
5. 锁模脉冲式：在脉冲激光器中加上锁模装置，可以获得脉宽为微微秒量级的激光脉冲列。

一、工作原理

固体激光器不是原子发光，而是离子发光。所谓离子就是失掉一些电子的原子，这种离子叫激活离子。固体激光器的激活物质有两种能级结构：三能级和四能级结构(图1-5)。红宝石是三能级结构，Nd:YAG是四能级结构。如图1-5 a 所示，由于激励能源的作用使基态 E_1 上的离子跃迁到 E_3 能级上，这种离子在 E_3 能级上停留时间很短，很快就从 E_3 又跃迁到亚稳态 E_2 能级上，多余能量以热的形式释放出来，其跃迁过程是无辐射跃迁。由于离子在 E_2 能级上停留时间较长，所以激活离子在 E_2 上不断进行积累，最后使 E_2 上的离子数多于 E_1 上的离子数，在 E_2 和 E_1 能级间实现粒子数反转分布。当离子从 E_2 跃迁回 E_1 时便产生受激辐射，即产生激光。

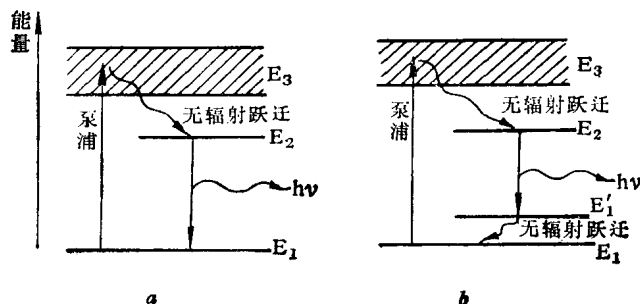


图 1-5

在图1-5 b 所示的四能级结构中，基态离子受激励之后从 E_1 跃迁到 E_3 ，由 E_3 以无辐射跃迁方式到达亚稳态 E_2 。由于在 E_2 与 E_1 之间有一个 E_1' 能级，在室温下，离子在 E_1' 上停留时间很短，所以在 E_1' 上几乎没有离子存在，因而在 E_2 和 E_1' 之间很容易形成粒子数反转，即形成产生激光的前提条件。当离子从 E_2 向 E_1' 跃迁时便产生受激辐射、即激光。离子从 E_1' 向 E_1 的跃迁也是无辐射跃迁。

红宝石激光器的工作物质是在三氧化二铝 (Al_2O_3) 基质中掺入约 0.05% 的三氧化二铬 (Cr_2O_3)。铬离子 Cr^{3+} 在晶体中取代 Al^{3+} 位置而均匀分布在其中。铬离子的能级为三能级结构。激光的中心波长约为 6943 \AA 。

钕铝石榴石晶体(YAG)是由 Y_2O_3 和 Al_2O_3 按 3:5 化合而成。掺钕钕铝石榴石 (Nd^{3+} : YAG) 是在 YAG 中掺入 Nd_2O_3 ，在晶体中 Nd^{3+} 以杂质形式出现，它替代 Y^{3+} 的位置，一般掺

入的 Nd^{3+} 约占 Y^{3+} 的1%左右。呈浅紫红色。钕离子 Nd^{3+} 的能级为四能级结构。发射激光的中心波长为 $1.064\mu(10640\text{ \AA})$ 。 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 材料具有阈值低、效率高、晶体使用寿命长等特点,可以形成连续激光输出,是目前研究和比较广泛的一种激光材料。

二、固体激光器的结构

固体激光器除工作物质外,还有谐振腔、激励能源、聚光器等。图1-6为固体激光器的结构示意图。

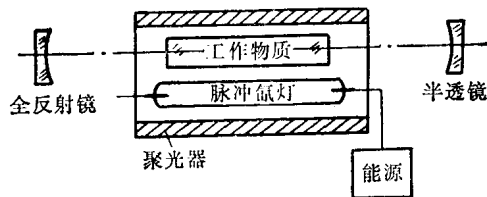


图 1-6

(一) 谐振腔

谐振腔的作用是使增益介质的受激辐射光子在腔内形成振荡放大,从而产生激光。固体激光器的谐振腔可由在激光棒两端加工成相互平行(平行度 $\leq 10''$)的光洁度较高的端面构成,称内腔式。对于调 Q 器件,棒两端要镀增透膜,以防止自振。也可以在激光棒两端面外安置反射镜,构成外腔式谐振腔。

(二) 激励方式

固体激光器一般采用光激发。脉冲激光器主要采用脉冲氙灯,而连续的YAG器件则采用连续氙灯或碘钨灯。脉冲氙(Xe)灯由石英管制成,两端通过过渡玻璃封以钨钨(或钨钨、铈钨)电极,管内充以30~300托(mmHg)的氙气。连续氙灯结构与氙灯相似,但管内是充以2~4个大气压的氙气。碘钨灯是石英管制成的直管状钨丝白炽灯,内部充以碘蒸汽,以提高灯的亮度。放电管除了直线型外,还有螺旋型、 π 型等。放电管两端电极加直流高压。

放电管的电源及触发电路形式很多,将在后面结合具体仪器举例说明之。

(三) 聚光器

为使激发光能量尽可能多地被工作物质所吸收,需要良好的聚光器。聚光器的型式较多,有圆柱面型(图1-7a)、单椭圆圆柱面型(图1-7b)、双椭圆圆柱面型(图1-7c)、椭球型(图1-7d)等。目前使用最多的是单椭圆圆柱面聚光器。

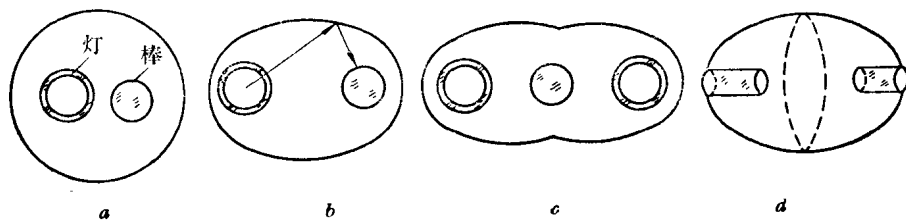


图 1-7 聚光器的几种型式

此外,固体激光器还有冷却和滤光系统。重复频率高的激光器和连续激光器在工作过程中会产生大量热量,使工作物质温度显著上升,轻者使工作物质荧光寿命下降,直至停止发射激光,严重时将造成棒炸裂。为此需要有良好的冷却装置。光泵的紫外光对钨玻璃和YAG晶体特别有害,轻者使之变色,效率下降,重则不能输出激光。故需加滤光手段。最简单的冷却滤光系统是滤光冷却液。

§ 1-4 气体激光器

气体激光器的工作物质是气体状态的原子、离子、分子。利用不同的气体激光器可以得到多种波长的激光。现在，气体激光器已经在 0.116μ 的紫外光到 1.84mm 的远红外光这个广阔波段内，实现了数千条谱线的连续激光输出，而且具有很大的功率范围。其输出频率和幅度稳定，是良好的低噪声激光器。然而，并不是所有的气体激光器都适用于激光测量仪器的使用要求。

激光测量仪器一般都在野外作业，移动频繁，在选择激光器时应考虑下列基本要求：体积小、寿命长、结构简单、使用方便；馈电功率不大，有足够的功率输出，能在寒冷的冬天工作；具有较高的大气透过率；有与激光波长相对应的灵敏度高、响应速度快的光探测器。发射红光（波长 0.6328μ ）的氦氖气体激光器基本上符合上述要求，在精密测距仪、激光经纬仪、激光准直仪、激光陀螺仪等测量仪器中获得了广泛的应用。因此本节只介绍He-Ne激光器。

一、He-Ne激光器的构造

He-Ne激光器由放电管、谐振腔和激励源构成，图1-8为其结构示意图。

（一）放电管

放电管是由石英玻璃或硬质玻璃制成，管内充以氦(He)氖(Ne)混合气体。放电管要有良好的导热性能。放电管的内径从几毫米到几十毫米。放电管的长度一般在十几厘米到几米之间，管子愈长输出功率愈强。实验证明，在最佳充气压和气体配比下增益系数有如下关系式：

$$G_m = 3 \times 10^{-4} \frac{l}{d} \quad (1-2)$$

式中 G_m ——增益系数；

l ——有效放电长度，即毛细管长度；

d ——毛细管内径。

（二）谐振腔

气体激光器中常用的光学谐振腔有如下几种：

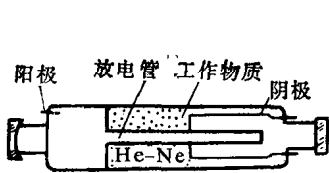


图 1-8 He-Ne激光器示意图

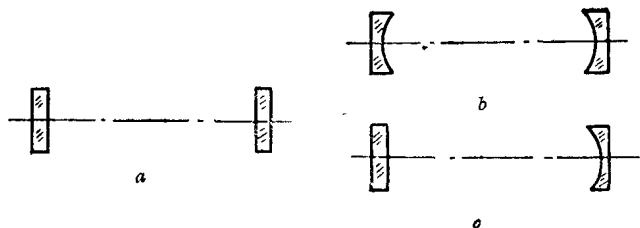


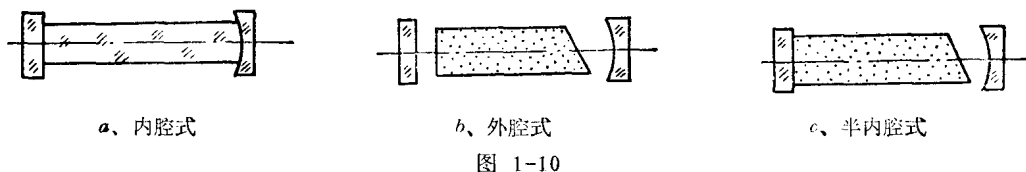
图 1-9 三种谐振腔

1. 平行平面镜腔(图1-9 a)。输出强，但对两平行平面的平行度及平面的加工精度要求高，调整困难。

2. 球面反射镜腔(图1-9 b)。对两镜面相对位置要求较低，调整较容易。

3. 平面球面镜腔(图1-9 c)。调整较容易，而且容易获得稳定的单模输出。

根据谐振腔反射镜和放电管的关系, 光学谐振腔可分为内腔式、外腔式和半内腔式等结构形式(图1-10)。



外腔式和半内腔式的优点是可直接输出线偏振光, 进行内调制较方便。内腔式的优点是整体性强, 输出功率较高, 但不能直接输出线偏振光。

(三) 激励源

气体激光器的激励方式一般采用气体放电, 只在某些特殊情况下才采用光激发、化学反应激励、热激励等方式。激励电源有下述几种: 直流放电; 交流放电; 脉冲放电, 当需要某些特殊波长输出时采用; 高频放电, 频率可达30~40兆赫, 功率一般是几十瓦。实际工作中直流电源放电方式用得最多, 因激光输出的平稳性能好。直流电压一般上千伏, 电流由几毫安到几十毫安。

二、He-Ne 激光器的激发机理

He-Ne激光器的工作物质是He气和Ne气, 其能级图如图1-11所示。图中 1^1S 、 $1S$ 、 $2S$ 、 $2P$ 、 $3P$ 等是能级或能级组的名称。Ne原子的 $3S$ 、 $2S$ 和 $1S$ 并不是一个能级, 而是由4个能级组成的能带, $2P$ 是由10个能级组成的一个能带。 $2S$ 和 $3S$ 能级平均寿命大约比 $2P$ 能级长10倍, $1S$ 是亚稳态能级。当放电管内的气体被激励之后, 快速电子与He原子碰撞, 电子能量转移给He原子, 使He原子由基态跃迁到 2^3S 和 2^1S 上。因为He的 2^3S 和 2^1S 能级分别与Ne的 $2S$ 和 $3S$ 能级很接近, 所以He与Ne碰撞很容易将能量再转给Ne, 这种现象叫做共振转移。共振转移之后, Ne原子即从基态激发到 $2S$ 和 $3S$ 能级上去, 而He原子则返回到基态 1^1S 上。这样就实现了 $3S$ 和 $2S$ 对 $2P$ 、 $3S$ 对 $3P$ 、 $2S$ 对 $2P$ 能级间的粒子数反转和跃迁, $3P$ 和 $2P$ 上的粒子又回到亚稳能级 $1S$ 上, 从而获得 3.39μ 、 1.15μ 和 0.6328μ 三条激光谱线。其中以 0.6328μ 谱线最强, 并且可以利用谐振腔的抑制作用把 3.39μ 和 1.15μ 波长抑制掉, 而获得 0.6328μ 波长的输出。

现在常用的He-Ne激光器还有一种结构是放电管的一端或两端制成一个布儒斯特角, 如图1-12所示。布儒斯特角(简称布角)的大小由窗口镜片材料和光波波长决定, 可由公式 $\text{tg}\varphi = n_x$ 确定。其中, φ 是布角, n_x 是光波在该窗口材料中的折射率。例如, 0.6328μ 波长在石英片中的折射率是1.45, 布角等于 $55^\circ 30'$ 。

He-Ne激光器的缺点是增益低, 输出功率小(十分之几毫瓦至一瓦), 能量转换效率低, 约为万分之一。

三、光学谐振腔的振荡模式

激光具有亮度高、单色性、方向性和相干性好等特性, 是与光学谐振腔在激光的产生中所起的作用分不开的。如果谐振腔的几何光学结构安排不当, 就不能满足谐振腔的稳定条件, 因而就没有激光输出。虽然激光的单色性很高, 可以认为仅以一个频率工作。但是, 实际上一般激光器都存在着若干荧光谱线, 并且这些谱线有一定宽度。为什么激光会有多