第一章

激光和激光器

需要全本请访问 www.ertongbook.com

激光产生的物理机制

激光的曾用名是“莱塞”,别名“镭射”。这两个名称都是其英文名“Laser”的译音,该词的5个字母分别为光(Light)、放大(Amplification)、受激(Stimulated)、发射(Emission)和辐射(Radiation)的字头,这揭示了激光的物理本质,即光的受激辐射放大(Light amplification by stimulated emission of radiation)。所以,要了解激光,应该从受激辐射开始。为此,我们必须首先回顾一下原子能级的概念。

1. 原子的能级结构

物质是由原子组成的。原子的几何尺寸非常小,一个普通缝衣针的针尖上就可以排列数以百万计的原子。

著名英国物理学家卢瑟福(Rutherford)和他的两名学生盖革(Geiger)及马尔斯登(Marsden),于1910年至1911年所进行的α粒子散射实验证明原子具有核式结构,即原子是由中央原子核和外围电子组成的。而原子核内则含有带正电荷的质子和不带电的中子,质子所带的正电荷与周围电子所带的负电荷数量相等,极性相反,因而整个原子表现为电中性。

1913年,年轻的丹麦物理学家玻尔(Bohr)提出原子的电子轨道模型。按照这种假设,核外电子只能沿若干可能的轨道之一绕核运转。相应于一组特定的电子轨道,原子具有一定的能量。用物理学的语言来说,即原子处于一定能级或一定的“态”。稳定情况下,电子总是沿这样的轨道——即使得原子处于能量最低的状态,通常称之为原子的基态——运动。只有受到某种外来激发作用时,原子才有可能上升到较高能态,并称为激发态。

由于电子轨道之间有一定距离,这就决定了原子能级也是阶跃式的,能级之间有一定间隔。也就是说,原子改变其能级只能采

取上、下台阶的方式，而不是沿斜面滑动的方式。

一般来说，电子在轨道上的分布有很多种方式，相应地，原子会有很多能级。但是，与激光发射直接相关的主要有两个能级。为简单起见，且不失一般性，本章只涉及原子的这两个能级。其中能量较低的称为激光下能级，或简称为下能级，能量较高的则称为激光上能级，或简称为上能级。只有两个能级的原子称为二能级系统。就二能级系统来说，上能级所对应的原子态称为激发态，而下能级所对应的原子态即是基态。图 1－1 是二能级系统两个能级的形象表示，这里已假定原子处于基态。



图 1－1　二能级原子能级的形象表示

2. 辐射与物质的相互作用

正如前面所述,处于基态的原子是稳定的,只有当它受到外界某种作用，并获得一定能量时，才有可能跃迁到较高能态上去。例如，在光辐射的照射下，原子可以吸收一个具有适当能量的光子而被激发，并跃迁到激发态，这种过程称为受激吸收跃迁。

原子激发态的寿命很短,也就是说,被激发的原子不能长时间滞留在高能态，而是会按以下两种方式之一很快向下跃迁回到基态：

(1)没有外界作用，原子自发地由激发态跃迁到基态，并辐射一个与当初被吸收光子的能量相同的光子，这种过程称为自发辐射跃迁。

(2)处于高能态的原子，受到某种外来辐射的激励，在一定条件下，发射一个光子，原子由激发态跃迁到基态。这种过程称为受激辐射跃迁，它是由爱因斯坦(Einstein) 于 1917 年首先提出的。图 1－2 是受激吸收、自发辐射和受激辐射三种过程的示意图。

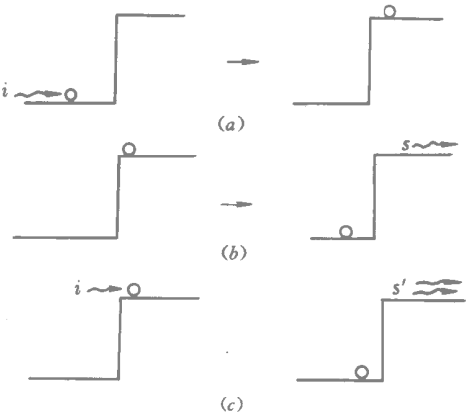


图 1－2　辐射与原子作用三种过程示意图

(a)受激吸收；i—入射光；

(b)自发辐射；s— 自发辐射光；

(c)受激辐射；i— 入射光，s' — 受激辐射光。

在爱因斯坦预言该过程以后又过了 10 年，杰出的英国物理学家、剑桥大学物理系教授狄拉克(Dirac) 首先发现受激辐射有一些与普通发光不同的特点。事实上，受激辐射过程正是产生激光的基础。遗憾的是，当爱因斯坦从理论上首次论证该过程的存在时，同时代的任何人，包括爱因斯坦本人，都无法想象在若干年后的某一天，人类会基于这一天才的理论创造出比太阳亮很多倍的神奇的光。更为遗憾的是，这位天才的物理学家，从未有机会见到过激光。在世界上第一台激光器诞生前整整 5 年，科学史上这颗最灿烂的巨星 —— 爱因斯坦 —— 于 1955 年 4 月 18 日在美国普林斯顿殒落，而将其耀眼的光辉永远留在人间。

3. 辐射的受激放大

这一小节将对受激辐射和吸收给以比较定量的描述，以阐明辐射受激放大的条件。为此，用 $h\nu$ 表示光子能量，其中 ν 是光的频率，在可见光区域，ν 的量级为 10^{14} 赫兹，h 是普朗克 (Plank) 常量，

它的值为 6.626×10^{-34} 焦耳·秒。此外，设基态原子的能量为 E_1，激发态的为 E_2。由上小节的讨论可知，当有外来辐射作用于二能级系统时，会发生两种可能的过程：

(1)受激吸收　即处于低能级的原子吸收入射光子并跃迁到高能级，上、下能级的能量差 ΔE 恰好等于入射光子的能量，即

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$$

也就是说，原子因吸收光子而增加的能量与入射光损失的能量相等，这正是能量守恒定律所要求的。

(2)受激辐射　即处于上能级的原子在入射光的作用下辐射一个能量为 $h\nu$ 的光子，其本身能量减小 $\Delta E=h\nu$ 而回到基态，入射光则因得到一个光子而能量增加 $h\nu$，由此可见，受激辐射的结果使入射光得到放大。

显然，入射光与原子系统作用后总的效果是被衰减还是得到放大，完全取决于以上两种过程中哪一种占主导地位。如果受激吸收超过受激辐射，则光的衰减大于增益，即总的效果是光被衰减；反过来，如果受激辐射占据主导地位，则光将得到放大。

受激吸收的强度由两方面因素决定，即处于下能级的原子数密度 N_1 和每个原子吸收光子跃迁到上能级的概率 W_{12}。类似地，受激辐射的强度则由上能级原子数密度 N_2 和原子受激辐射光子并跃迁到下能级的概率 W_{21} 决定。研究表明，原子系统在光辐射作用下由上能级跃迁到下能级的概率等于由下能级跃迁到上能级的概率，于是，产生受激放大的条件是原子系统上能级粒子数密度 N_2 大于下能级粒子数密度 N_1，这一点对激光的产生具有根本性重要意义。

但是，在热平衡条件下，系统对光的吸收总是占据主导地位。由此可见，上能级粒子数密度 N_2 大于下能级粒子数密度 N_1 的条件与热平衡条件下的粒子数分布状态正好相反。由于这个原因，激光文献中将产生激光的状态称为“粒子数反转分布状态”。

总之，以上讨论表明，光辐射受激放大的基本条件是在工作物

需要全本请访问 www.ertongbook.com

质中实现粒子数反转分布状态,而且,$\Delta N=N_2-N_1$ 越大,可望获得的增益就越高,ΔN 称为反转粒子数。

不难理解,为了实现粒子数反转分布,必须有适当形式的外界能量对产生激光的材料(即工作物质)进行激励(或称"泵浦"),以使足够多的粒子由下能级跃迁到上能级。泵浦技术有多种方式,现就比较常用的几种方式简单介绍如下:

(1)电泵浦 电泵浦适合于气体工作物质,方式之一是将激光介质置于电子束中,通过相互碰撞,电子把一部分能量传给气体原子,使大量原子跃迁到上能级,产生粒子数反转分布。

更通用的电泵浦方式是直流放电,在这种情况下,放电是在含有气体工作物质的放电管中进行,原子从电流中吸收能量向上能级跃迁实现粒子数反转分布。

(2)光泵浦 以固体材料为工作物质的激光器多数采用光泵浦方式。在光照射下,原子吸收能量相应于其能级差的光子由下能级跃迁到上能级,从而实现粒子数反转分布。

(3)其他泵浦方式 有一类激光器称为化学激光器,工作物质通过吸收化学反应所释放的能量而达到粒子数反转分布。自由电子激光器由高能电子泵浦,而一些波长非常短的激光器则需要用核爆炸产生的能量或其他激光辐射进行泵浦。

实现粒子数反转分布的难易及 ΔN 的大小,与工作物质的种类及所选工作能级有关。对此本章不再进一步讨论,感兴趣的读者可参阅有关文献。

4. 光自激振荡和激光谐振腔

假定已经通过某种方式将激光工作物质激发到粒子数反转分布状态,由于自发辐射过程的存在,将会有部分处于激光上能级的原子向下能级跃迁,并向各个方向无规则地辐射一些光子,如图 1-3 所示,其中必然会有部分光子沿介质的轴向传播。因为介质处于粒子数反转分布状态,所以,这部分光子将不断得到放大,如图 1-4 所示。理论上讲,只要放大介质有足够的长度,则不管初始

发辐射何等微弱，总可以被放大到有限的强度。熟悉无线电技术的读者都知道，这就是振荡的概念。



图 1—3　自发辐射产生的光子，一部分沿介质轴向传播



图 1—4　沿介质轴向传播的光被放大

但是，在实际激光器中，放大介质没有可能也没有必要特别长，而是在其两端放两块反射镜，使光得以来回反射。最初与介质轴有一定夹角的光，每反射一次夹角便增大一倍（假定为平面反射镜），几次反射后沿侧壁逸出腔外。只有与介质轴方向一致的光可以多次通过介质并被不断放大。放大到一定程度后，由反射面（或反射镜)之一(称为部分反射镜或输出镜)输出,这就是经受激辐射放大的光,即激光,如图 1—5 所示。为充分利用光能，介质被置于一聚光腔体中，后者与端面反射镜共同构成激光谐振腔。

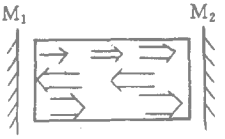


图 1—5　光在激活介质中反复传播被放大

M_1—全反射镜 M_2— 部分反射镜。

总而言之，激光器是由谐振腔和工作物质组成的（如图 1—6 所示），而为使后者处于粒子数反转分布状态，则还需要有某种泵浦源，泵浦源是激光能量的源泉。

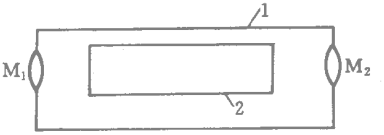


图 1－6　激光器的组成

1－聚光腔；2－激活介质；M_1－全反射镜；M_2－部分反射镜。

激光器发明的历史过程

在激光器发明之前 6 年左右，一个与之关系甚为密切的新事物首先问世，这就是“脉泽”，它是英文 Maser 的音译，其物理本质是微波的受激辐射放大。

事情要追溯到 1951 年。那是一个春光明媚的早晨，汤斯(Townes)坐在华盛顿国家公园的一张长凳上，在一枚普通信封的背面进行着计算。就这样，他的计算结果在记录本世纪重大发明的史册上增添了新的一页：原子和分子可以用作辐射放大器，对高于普通无线电波和雷达波的频率进行放大。

第二次世界大战期间，汤斯在贝尔(Bell)电话公司的实验室工作，在那里，他成为一名微波通信与雷达专家。在电磁波谱中，微波介于超高频无线电波和红外辐射之间，其频率为 $10^9 \sim 10^{11}$ 赫兹，相应的波长为 30～0.3 厘米。当然，电磁波谱的分界线并非十分精确，有些文献所给出的频率或波长范围或许会与以上所述略有差异。

电磁波频率越高，在空间传播时就越不容易弥散，抗干扰能力也就越强，这在探测和测距中十分重要。因此，包括汤斯在内的雷达工程师们希望进一步提高雷达波的工作频率。而汤斯本人此时正致力于研制一种工作在 2.4×10^{10} 赫兹的装置，并开始对微波摄谱学发生兴趣。这项工作在最终导致脉泽和激光器的发明方面起了重要作用。

1951 年汤斯是哥伦比亚大学的物理学教授，他和对上述问题

感兴趣的科学家们约定 4 月 26 日在华盛顿特区举行一次科学讨论会。讨论会的前一天晚上，他在华盛顿一家小旅店与肖洛(Schawlow)同住一个房间。汤斯因家有小孩而习惯早起，而肖洛，当时还是个单身汉，则喜欢晚睡。第二天早晨 5 点半左右，汤斯醒来后穿好衣服走出门外，以科学家特有的方式尽情地享受着华盛顿黎明的春光。他眼睛盯着盛开的杜鹃花，脑海里却充满了如何获得高频电磁波的问题。突然间一个杰出的思想在他的头脑里产生了：或许可以用原子或分子来产生波长极短的辐射。汤斯后来回忆起当时的情景时说："在几分钟之内，我完成了一项计算——在一枚普通信封的背面——用必须提供的受激分子数和腔内允许的最大损耗表示产生振荡的临界条件"。他的仓促计算是对氨分子进行的，正如肖洛所说："对该分子详细的理解正是汤斯为发明脉泽所需要的。"

前面说过，为了有效地产生激光，需要选择激活介质和工作能级，脉泽也是如此。汤斯之所以把氨（化学分子式为 NH_3）作为研究对象，就是因为氨有两个特殊能级，即基态能级和一个上能级，能级之差恰好等于频率为 2.4×10^{10} 赫兹的微波所对应的能量。汤斯想要做的就是将容器中的大部分氨分子从基态激励到上能级，然后用频率为 2.4×10^{10} 赫兹的微波去照射它们，以获得微波量子振荡器，即脉泽。1954 年初，由汤斯所领导的研究小组终于首次用氨分子装置实现了微波振荡。

量子振荡器可能输出的功率依赖于工作物质中的可激活分子数密度。因而气体介质输出功率小。所以，气体脉泽研制成功后，当时很多科学家，包括汤斯，前苏联的巴索夫(Basov)和普罗霍洛夫(Prokhorov)，以及哈佛大学的布洛姆伯根(Bloembergen)等便立即着手研究在固体中产生脉泽的可能性。虽然科学家们在 50 年代中期已经搞清楚几乎所有有关的理论问题，但要基于这些原理制造固态量子振荡器，尚需跨越很多工程上的障碍。直到 1958 年，第一个固体脉泽才在贝尔实验室诞生。采用制冷技术的固体脉泽能够以原子为振荡器而放大特别弱的微波信号。此项发明在雷达、

天文和卫星通信中有重要的应用价值,而巴索夫、普罗霍洛夫及汤斯也因他们在量子电子学领域的卓越贡献而分享了 1964 年度的诺贝尔物理学奖。

科学之所以能不停地向前发展，就是因为科学家们有一种孜孜不倦的执着追求精神。气体脉泽刚刚研究成功,便立即向新的目标进军。一方面,如上所述,他们努力研制可以有更高输出功率的固体量子振荡器 另一方面,则在考虑如何将工作频率从微波段进一步提高到光波段。当时,红宝石材料——一种掺有铬离子的氧化铝单晶——便成为主要研究对象。肖洛注意到,这种晶体很容易将受激辐射放大的原理从微波‘带到’光频段。他说“:下面的事实引起我强烈的兴趣，即用绿色和蓝色谱区的宽带光可以激发出很锐的红色荧光。”事实上,早在 1957 年肖洛已开始考虑将脉泽原理扩展到更短波长,即可见光波段。最初,他只有一个模糊的想法,认为晶体中的离子应该起某种关键作用。他对汤斯谈了这一想法,他们决定一起对此进行研究。而这一年的晚些时候，高德(Gould)于 1957 年 11 月 13 日在笔记本上记载了他自己关于激光器的思想，20 年后的 1977 年 10 月 11 日，高德因此而获得激光器的发明专利权。

汤斯和肖洛从 1951 年春天的那个早晨建立的脉泽方程入手进行研究。他们发现谐振腔中的光波只在侧壁才损耗能量,而当它从腔的一端沿与轴平行的方向向另一端传播时，将会由于激活介质受激辐射光子而得到增强。稍后,肖洛认为可以用一种更加简单的方式构成光学谐振腔,即去掉普通谐振腔所有的侧壁,在圆柱形放大介质沿长度方向的两端镀反射膜，只要介质端面的尺寸比光的波长大得多,它们就可以使波在其间来回反射。最初与光轴哪怕只有很小夹角的光束几次反射后将由介质侧面逸出，保留下来的波则可以反复通过激活介质而被放大。

汤斯和肖洛在 1958 年 12 月 15 日出版的《物理评论》上发表了他们的上述想法,并立即引起人们极大的兴趣。世界上很多科学家尝试在实验室制造这种装置,其中包括汤斯本人。不幸的是,就

像其他很多人一样，他的努力也受到了挫折。

正当失败的阴云笼罩的时候，1960年，美国休斯飞机公司的科学家梅曼（Maiman）博士成功地在一根红宝石棒中实现了粒子数反转分布。紧接着，一道霞光——人们长期为之奋斗的神奇的光，把怀疑主义送进了历史的博物馆。图1–7这张历史性照片就是梅曼博士和他的第一台激光器；图1–8是第一台红宝石激光器的外形图；而图1–9则是典型的红宝石激光器的结构原理图。



图1–7梅曼和他的第一台激光器

为进一步改善激光性能或满足一些特殊应用的要求，现代激光器的内部结构比第一台激光器复杂得多（见彩图1–1），而外观也要比后者好看得多（见彩图1–2）.

需要全本请访问 www.ertongbook.com

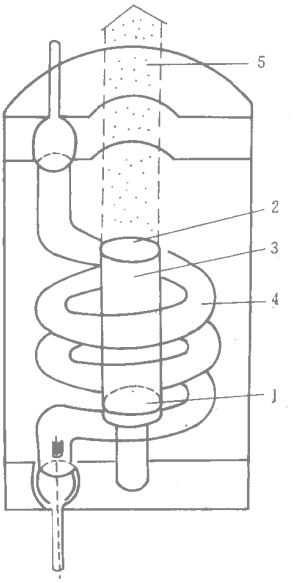


图 1—8　世界上第一台激光器外形图

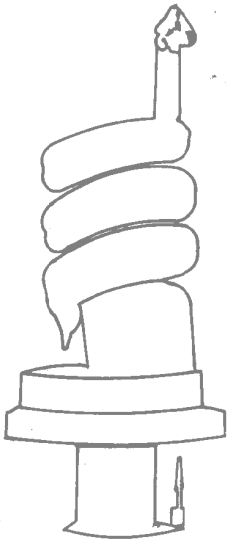


图 1—9　第一台红宝石激光器结构图
1—全反镜；2—部分反射镜；3—红宝石棒；4—石英闪光灯管　5— 输出光束。

激光特性和激光器的种类

激光束那些令人难以想象但又不容置疑的特性是激光得到极其广泛的应用，包括军事应用的基础。而激光器令人眼花缭乱的、繁多的种类则可满足多种应用的需求。当然，由于篇幅所限，本节只能着重介绍那些已用于或可能用于激光武器系统的器件。

1. 激光的特性

激光有很多由其他光源发出的光无法比拟的特性。例如，其光束具有非常好的方向性，因而可以聚焦到一个很小的点上，获得极

高的光强度。同时，其颜色具有极高的纯度，单色性和方向性结合相位的稳定性，使激光成为相当理想的相干光源。

(1)单色性

激光的单色性可以通过分光元件，例如玻璃棱镜，显示出来。当一束白光照射到棱镜上时，输出光包括各种颜色成分（如图 1—10(*a*）所示），这表明白光的带宽覆盖整个光谱区，其宽度大约为 300 纳米(1 纳米= 10^{-9}米)。使白光通过红色滤光片，可以得到通常所说的“红光”。后者投射到棱镜上时，输出光也会被散开，得到从深红到浅红的色带（如图 1—10(*b*)所示），带宽约 20 纳米。然而，当某种颜色的激光入射到棱镜上时，几乎看不出入射光与出射光的颜色有什么差别（图 1—10(*c*)是一个例子，输出未散开），这表明激光具有很好的单色性。

需要指出的是，纵然是激光，也不可能是绝对单色的，即其谱线还会有一定弥散。但是，按一般标准来衡量，激光的确具有相当

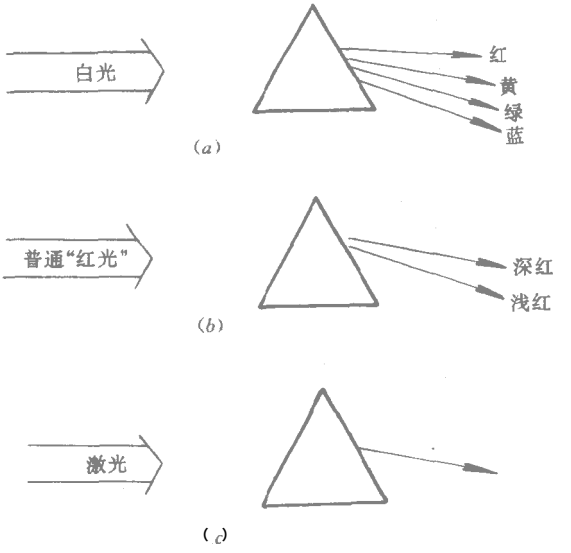


图 1—10　不同带宽的光通过棱镜色散

(*a*)白光入射；(*b*)普通“红光”入射；(*c*)激光入射。

好的单色性。例如氦-氖激光器(目前最常见的激光器之一)所发射红光的带宽典型情况下小于 1 纳米,采取特殊的稳频措施,甚至可将带宽压缩到 10^{-11} 米的量级。

(2)方向性

激光的另一个重要特性是具有很好的方向性（只有非常小的发散角,如图 1—11 所示）。普通聚光灯产生的光束传播几百米就会在空间上散开，而激光束则可以传播几百千米才有明显扩展。这是因为，激光的发散角虽然不可能是零，但与其他光源所发出的光相比，可以非常小。

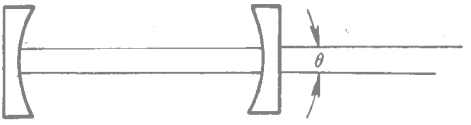


图 1—11　激光器输出发散角很小的光束

(3)高相干光强

由于激光的能量集中在近乎平行的窄光束中，故能量密度相当高，又因其单色性好，所以很容易通过聚焦而获得更细的光束，以致其亮度可高达太阳亮度的兆亿倍！简直达到令人难以想象的地步，这一特性对高能激光武器的应用无疑是十分重要的。

当然，为了得到极高的能量密度，往往需要采取一些特殊措施,如放大、调 Q、锁模等，这些都属于激光技术的范畴，感兴趣的读者可参阅有关专门书籍。

(4)激光器的工作状态

正常运转的激光器有两种工作状态，即连续输出状态和脉冲输出状态。它可能按两种状态之一工作。连续状态是指自激光器开动的瞬间起，便有激光束无间歇地输出，直到激光器被关断为止(如图 1—12 所示）。而脉冲工作状态是指激光器开启后只在一定的(通常是很短的)时间间隔内有能量输出,其余时间均无激光(图 1—13(*a*)),或者每隔一定时间输出一束激光(称为一个光脉冲),

并形成一串脉冲(图 1－13(*b*))。前一种情况称为单脉冲输出,后一种情况则称为重频输出。光脉冲两个半峰值能量点之间的间隔通常被定义为脉冲宽度,并用 τ 表示。而在重频情况下，每秒钟的脉冲个数(PPS)则称为脉冲重复率。

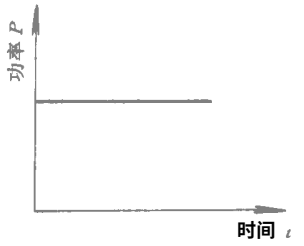


图 1－12　连续激光的功率输出

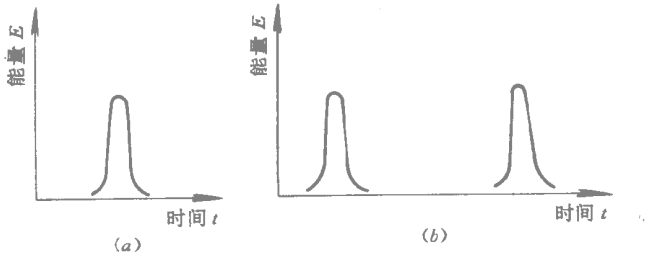


图 1－13　脉冲激光的能量输出

(*a*)单脉冲情况;(*b*)重频情况。

就激光武器应用而言，需要特别关心的是激光的能量水平。对连续运转激光,常用其单位时间输出的能量,即功率 P(等于输出能量 E 与时间 t 之比)来表示。

对脉冲激光，通常都给出其一个脉冲所含能量 E。则该脉冲激光的平均功率 $\overline{P}$ 等于脉冲数 N 和 E 的乘积与时间 t 之比,峰值功率 P_p 为输出能量 E 与脉冲宽度 τ 之比。

尽可能提高峰值功率无疑是激光武器所追求的，不难理解，为了提高 P_p,应尽量增加 E 或压缩 τ。由于提高激光脉冲的能量受

到更多因素的限制，因此，相当大的注意力被放在压缩脉宽上。在激光器发明后仅仅过了一年左右的时间，能有效压缩激光脉宽的所谓‘调 Q’技术便应运而生。又过了几年，更加强有力的‘锁模’技术获得成功。这两种技术的原理都涉及到一些专门知识，本书不打算深入讨论，只希望读者了解用当今的调 Q 和锁模技术能将激光脉宽压缩到什么程度，以及能使峰值功率提高到何等水平。

一台普通脉冲激光器输出脉宽很难比几十微秒更窄，这样，对能量为 1 焦耳的脉冲，其峰值功率为 10^5 瓦的量级。采用调 Q 技术，可将脉宽压缩到几十纳秒（1 纳秒＝10^{-9} 秒）量级，假定脉冲能量不变，峰值功率则可提高到 10^8 瓦的水平。而当前的锁模技术，可以得到飞秒（1 飞秒＝10^{-15} 秒）量级的超短脉冲，这样，即使脉冲能量只有 1 毫焦，峰值功率也可高达 $10^{11}\sim10^{12}$ 瓦的水平。

对这种以超短脉冲工作的激光器，即使重复频率很高，有激光输出的时间与无激光输出的时间相比（称为“占空比”）仍是很小的。例如，上述飞秒级脉宽激光，重复频率纵然达到兆赫兹，其占空比也只有 10^{-8}，可以形象地称之为‘一日打鱼，亿日晒网’。若仍假设激光脉冲能量为 1 毫焦，峰值功率在 10^{11} 瓦以上，而其平均功率则只有千瓦量级。

2. 激光器的种类

由前面的讨论已经知道，激光器有连续运转与脉冲运转之分，而后者又有单脉冲输出和重频输出之别，这是激光器的一种分类方式，即按工作状态分类。此外，还可以根据泵浦方式的不同而分为电泵浦激光器、光泵浦激光器、化学能泵浦激光器和核能泵浦激光器等。而更常见的则是按工作物质的形态分为气体激光器、固体激光器、液体激光器、半导体激光器、准分子激光器、X 射线激光器、自由电子激光器等等。当然，不同分类方式之间是互相交错的，例如，气体激光器多数采用电泵浦，但也不排除采用其他方式进行泵浦的可能性，它们既可工作在连续状态，也可以脉冲方式运转；脉冲运转的激光器既可以固体为工作物质，也可以液体为工作物

质等等。下面依据激光工作物质的形态着重介绍与武器应用关系密切的激光器类型。

(1)气体激光器

顾名思义，气体激光器以气体介质为工作物质。常见的有氦-氖(He-Ne)激光器、二氧化碳(CO_2)激光器、氩离子(Ar^+)激光器、准分子激光器、氟化氢(HF)激光器等。表 1—1 列出它们的主要特性，下面就其中几种作些介绍。

表 1—1 常见气体激光器及主要特性

激光器类型	输出波长/纳米	典型运转方式	输出(平均)功率/瓦
氦-氖	632.8	连续	0.0001～0.05
二氧化碳	9000～12000	脉冲或连续	(0.1～15000)×10^6
氩离子	350～514.5	连续	0.001～20
氟化氢	2600～3000	脉冲或连续	(0.1～150)×10^6
氟化氩	193	脉冲	0.5～30
氟化氪	249	脉冲	7～100
氟化氙	351	连续	0.5～30

①氦-氖激光器

氦-氖激光器主要由放电管、电极和光学谐振腔几部分组成(如图 1—14 所示)。充有氦、氖混合气体的放电管通常由毛细管和贮气室构成，它是激光器的核心。

氦-氖激光器结构简单、价格低廉，在实验室和日常生活中得到非常广泛的应用。特别值得一提的是，氦-氖激光功率很低，似乎与威力巨大的激光武器无缘，但它却在环形激光陀螺仪中为自己找到一席之地。这种陀螺仪被用来稳定军用飞机、直升机，并能帮助潜艇导航。激光陀螺仪的体积可以非常小，以适应控制精密制导炸弹的需要。

同样以惰性气体为工作物质的氩(Ar)激光器和氪(Kr)激光器与上述氦-氖激光器的原理及结构大体相同，但它们的输出功率

需要全本请访问 www.ertongbook.com