

激光入门知识

一、激光产生原理

1、普通光源的发光——受激吸收和自发辐射

普通常见光源的发光（如电灯、火焰、太阳等地发光）是由于物质在受到外来能量（如光能、电能、热能等）作用时，原子中的电子就会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。处在高能级（ E_2 ）的电子寿命很短（一般为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 秒），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的射向四面八方，另外未位相、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，而有一个范围。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低，这是因为处于能级 E 的原子数密度 N 的大小时随能级 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。于是在上、下两个能级上的原子数密度比为 $N_2/N_1 \propto \exp\{-(E_2 - E_1)/kT\}$ ；式中 k 为波耳兹曼常量， T 为绝对温度。因为 $E_2 > E_1$ ，所以 $N_2 \ll N_1$ 。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： $N_2/N_1 \propto \exp(-400) \approx 0$ 可见，在 20°C 时，全部氢原子几乎都处于基态，要使原子发光，必须外界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，这种光源所辐射光的能量是不强的，加上向四面八方发射，更使能量分散了。

2、受激辐射和光的放大：

由量子理论知识知道，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。但是实际描写原子中电子运动状态，除能量外，还有轨道角动量 L 和自旋角动量 s ，它们都是量子化的，由相应的量子数来描述。对轨道角动量，波尔曾给出了量子化公式 $L_n = nh$ ，但这不严格，因这个式子还是在把电子运动看作轨道运动基础上得到的。严格的能量量子化以及角动量量子化都应该有量子力学理论来推导。量子理论告诉我们，电子从高能态向低能态跃迁时只能发生在 l （角动量量子数）量子数相差 ± 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，则跃迁的几率很小，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，不易发生自发跃迁到低能级上。这种能级称为亚稳态能级。但是，在外加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，这是激光的基础。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的特点，就是原子可发出与诱发光子全同的光子，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。这意味着原来光信号被放大这种在受激过程中产生并被放大的光，就是激光。

3、粒子数反转

一个诱发光子不仅能引起受激辐射，而且它也能引起受激吸收，所以只有当处在高能级地原子数目比处在低能级的还多时，受激辐射跃迁才能超过受激吸收，而占优势。由此可见，为使光源发射激光，而不是发出普通光的关键是发光原子处在高能级的数目比低能级上的多，这种情况，称为粒子数反转。但在热平衡条件下，原子几乎都处于最低能级（基态）。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。

二、激光器的结构

激光器一般包括三个部分。

1、激光工作介质

激光的产生必须选择合适的工作介质，可以是气体、液体、固体或半导体。在这种介质中可以实现粒子数反转，以制造获得激光的必要条件。显然亚稳态能级的存在，对实现粒子数反转是非常有利的。现有工作介质近千种，可产生的激光波长包括从真空紫外道远红外，非常广泛。

2、激励源

为了使工作介质中出现粒子数反转，必须用一定的方法去激励原子体系，使处于上能级的粒子数增加。一般可以用气体放电的办法来利用具有动能的电子去激发介质原子，称为电激励；也可用脉冲光源来照射工作介质，称为光激励；还有热激励、化学激励等。各种激励方式被形象化地称为泵浦或抽运。为了不断得到激光输出，必须不断地“泵浦”以维持处于

上能级的粒子数比下能级多。

3、谐振腔

有了合适的工作物质和激励源后,可实现粒子数反转,但这样产生的受激辐射强度很弱,无法实际应用。于是人们就想到了用光学谐振腔进行放大。所谓光学谐振腔,实际是在激光器两端,面对面装上两块反射率很高的镜。一块几乎全反射,一块光大部分反射、少量透射出去,以使激光可透过这块镜子而射出。被反射回到工作介质的光,继续诱发新的受激辐射,光被放大。因此,光在谐振腔中来回振荡,造成连锁反应,雪崩似的获得放大,产生强烈的激光,从部分反射镜子一端输出。下面以红宝石激光器为例来说明激光的形成。工作物质是一根红宝石棒。红宝石是掺入少许 3 价铬离子的三氧化二铝晶体。实际是掺入质量比约为 0.05%的氧化铬。由于铬离子吸收白光中的绿光和蓝光,所以宝石呈粉红色。1960 年梅曼发明的激光器所产用的红宝石是一根直径 0.8cm、长约 8cm 的圆棒。两端面是一对平行平面镜,一端镀上全反射膜,一端有 10%的透射率, 可让激光透出。红宝石激光器中,用高压氙灯作“泵浦”,利用氙灯所发出的强光激发铬离子到达激发态 E3,被抽运到 E3 上的电子很快(~10-8s)通过无辐射跃迁到 E2。E2 是亚稳态能级,E2 到 E1 的自发辐射几率很小,寿命长达 10-3s,即允许粒子停留较长时间。于是,粒子就在 E2 上积聚起来,实现 E2 和 E1 两能级上的粒子数反转。从 E2 到 E1 受激发射的波长是 694.3nm 的红色激光。由脉冲氙灯得到的是脉冲激光,每一个光脉冲的持续时间不到 1ms,每个光脉冲能量在 10J 以上;也就是说,每个脉冲激光的功率可超过 10kW 的数量级。注意到上述铬离子从激发到发出激光的过程中涉及到三条能级,故称为三能级系统。由于在三能级系统中,下能级 E1 是基态,通常情况下积聚大量原子,所以要达到粒子数反转,要有相当强的激励才行。

三、激光器的种类

对激光器有不同的分类方法,一般按工作介质的不同来分类,在可以分为固体激光器、气体激光器、液体激光器和半导体激光器。另外,根据激光输出方式的不同又可分为连续激光器和脉冲激光器,其中脉冲激光的峰值功率可以非常大,还可以按发光的频率和发光功率大小分类。

1、固体激光器

一般讲,固体激光器具有器件小、坚固、使用方便、输出功率大的特点。这种激光器的工作介质是在作为基质材料的晶体或玻璃中均匀掺入少量激活离子,除了前面介绍用红宝石

和玻璃外，常用的还有钇铝石榴石（YAG）晶体中掺入三价钕离子的激光器，它发射 1060nm 的近红外激光。固体激光器一般连续功率可达 100W 以上，脉冲峰值功率可达 109W。

2、气体激光器

气体激光器具有结构简单、造价低；操作方便；工作介质均匀，光束质量好；以及能长时间较稳定地连续工作的特点。这也是目前品种最多、应用广泛的一类激光器，占有市场达 60% 左右。其中，氦-氖激光器是最常用的一种。

3、半导体激光器

半导体激光器是以半导体材料作为工作介质的。目前较成熟的是砷化镓激光器，发射 840nm 的激光。另有掺铝的砷化镓、硫化镉硫化锌等激光器。激励方式有光泵浦、电激励等。这种激光器体积小、质量轻、寿命长、结构简单而坚固，特别适于在飞机、车辆、宇宙飞船上用。在 70 年代末期，由于光纤通讯和光盘技术的发展大大推动了半导体激光器的发展。

4、液体激光器

常用的是染料激光器，采用有机染料最为工作介质。大多数情况是把有机染料溶于溶剂中（乙醇、丙酮、水等）中使用，也有以蒸气状态工作的。利用不同染料可获得不同波长激光（在可见光范围）。染料激光器一般使用激光作泵浦源，例如常用的有氩离子激光器等。液体激光器工作原理比较复杂。输出波长连续可调，且覆盖面宽是它的优点，使它也得到广泛应用。

四、激光简史和我国的激光技术

自爱因斯坦 1917 年提出受激辐射概念后，足足经过了 40 年，直到 1958 年，美国两位微波领域的科学家汤斯（C. H. Townes）和肖洛（A. I. Schawlow）才打破了沉寂的局面，发表了著名论文《红外与光学激射器》，指出了受激辐射为主的发光的可能性，以及必要条件实现“粒子数反转”。他们的论文使在光学领域工作的科学家马上兴奋起来，纷纷提出各种实现粒子数反转的实验方案，从此开辟了崭新的激光研究领域。同年苏联科学家巴索夫和普罗霍罗夫发表了《实现三能级粒子数反转和半导体激光器建议》论文，1959 年 9 月汤斯又提出了制造红宝石激光器的建议……1960 年 5 月 15 日加州休斯实验室的梅曼（T. H. Maiman）制成了世界上第一台红宝石激光器，获得了波长为 694.3nm 的激光。梅曼是利用红宝石晶体做发光材料，用发光密度很高的脉冲氙灯做激发光源（如图所示），实际他的研究早在 1957 年就开始了，多年的努力终于活动了历史上第一束激光。1964 年，汤斯、巴索夫和普罗霍

夫由于对激光研究的贡献分享了诺贝尔物理学奖。

中国第一台红宝石激光器于 1961 年 8 月在中国科学院长春光学精密机械研究所研制成功。这台激光器在结构上比梅曼所设计的有了新的改进，尤其是在当时我国工业水平比美国低得多，研制条件十分困难，全靠研究人员自己设计、动手制造。在这以后，我国的激光技术也得到了迅速发展，并在各个领域得到了广泛应用。1987 年 6 月，1012W 的大功率脉冲激光系统——神光装置，在中国科学院上海光学精密机械研究所研制成功，多年来为我国的激光聚变研究作出了很好的贡献。