第1章

先进激光制造技术基础

光，就其本质而言是一种电磁波，覆盖着电磁频谱一个相当宽（从X射线到远红外）的范围，只是波长比普通无线电波的更短。光由光子组成，在荧光（普通的太阳光、灯光、烛光等）中，光子与光子之间毫无关联，即波长不一样、相位不一样、偏振方向不一样、传播方向不一样，就像一支无组织、无纪律的光子部队，各光子都是散兵游勇，不能做到行动一致。而在许许多多的光源之中，有一束光尤为突出，所有光子都是相互关联的，即它们的频率（或波长）一致、相位一致、偏振方向一致、传播方向一致，好像是一支纪律严明的光子部队，有着极强的战斗力。这就是激光，激光是继原子能、计算机、半导体之后人类的又一重大发明，被称为“最快的刀”“最准的尺”“最亮的光”和“奇异的激光”。

1.1 激光产生的物理基础

根据普朗克辐射定律，爱因斯坦在1917年发表了《辐射的量子理论》[1]，从理论上说明了除了吸收光和自发发光，电子可以通过刺激来发射特定波长的光，从而奠定了激光的理论基础。

1.1.1 涉及的物理概念

1. 原子能级

1911年，英国科学家卢瑟福提出了原子模型，原子中间是原子核，电子围绕原子核不停地旋转，同时也不停地自转。1913年，丹麦物理学家玻尔提出了原子只能处于由不连续能级表征的一系列状态——定态上，从而原子的内能不能连续改变，而是一级一级分开的，这样的级就称为原子能级，用 $E_0, E_1, E_2, \cdots, E_n$ 表示，

如图 1-1 所示。

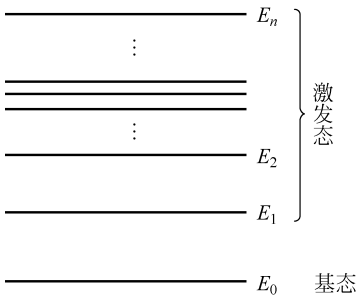


图 1-1　原子能级示意图

不同的原子具有不同的能级结构。原子中最低的能级称为基态，其余比基态能量高的能级称为高能态或激发态。

2. 原子能级跃迁

原子能量的任何变化(吸收或辐射)都只能在某两个定态之间进行，把原子的这种能量变化过程称为跃迁。当原子吸收或辐射一定的能量时，电子就跃迁到另一种可能轨道绕核运动，原子就具有另一种数值的能量。像这样的电子轨道发生变化，能量随之变化的过程就称为原子的能级跃迁。

1) 光子使原子能级跃迁的条件

具有一定能量的光子可以使处于某一定态的原子跃迁，根据玻尔的原子模型三条基本假设，认为：原子从一个定态(初始能量为 E_m)跃迁到另一定态(终态能量为 E_n)时，原子将吸收或辐射一定频率 ν 的光子，辐射或吸收的光子能量不是任意的，而是由这两个定态的能级差决定，即光子的频率满足[2]：

$$h\nu = E_m - E_n \tag{1-1}$$

其中，h 为普朗克常数(6.63×10^{-34} J·s)；ν 为频率(Hz)。

根据量子观点，光子是一份一份的，光子的能量 $h\nu$ 也是一份一份的，每一份光子的能量均是不可分裂的整体，用光子作用到原子上能使原子跃迁，也就是光子使原子共振就必须使光子的能量等于发生跃迁的两个能级的能量差值；光子的能量大于或小于这个值，均不能使原子发生共振，也就不能跃迁[3-4]。

2) 电子使原子能级跃迁的条件

电子使原子跃迁不是通过共振实现的，而是通过碰撞实现的。由于电子能量不是一份一份的，当电子速度增大到一定数值时与原子的碰撞是非弹性的，当电子与静止的原子碰撞，电子的动能可全部被原子吸收，使原子从一个较低的能级跃迁到另一个较高的能级，原子从电子中所攫取的能量只是两能级的能量之差。因此电子具有的动能必须大于或等于原子两个能级之差[3-4]。

3) 原子或分子使原子能级跃迁的条件

当原子或分子与原子碰撞时也可以使原子发生能级跃迁；当二粒子碰撞时，如果只有粒子平移能量的交换，内部能量不变，称为弹性碰撞；如果二粒子碰撞时，原子或分子的内部能量有增减，称为非弹性碰撞。这一类又有两种：如果部分能量转变为内部能量，使原子被激发跃迁，就是第一种非弹性碰撞；如果在碰撞时原子内部能量降低，放出的部分能量转变为平移能量，就是第二种非弹性碰撞。当

粒子平移动能较小时，它们之间只能有弹性碰撞；当粒子平移动能足够大时，使原子能够吸收能量从原有的低能级被激发到高能级，就能发生第一种非弹性碰撞。如果二粒子动能不大，就有可能发生第二种非弹性碰撞，使原子从高能级跃迁到低能级，相差的能量转变为粒子的动能。所以原子与原子碰撞使原子发生跃迁，必须使原子具有的动能比被激发跃迁的能级差大得多才能发生跃迁[5]。

4）电离的条件

电离是指将电子从基态激发到脱离原子，是一种特殊的原子能级跃迁。它属于原子能级间的跃迁，只是原子从基态（$n=1$）跃迁到最高能级状态（$n=\infty$），也就是电子从离核最近的轨道跃迁到离核最远的轨道（脱离原子核）。电离过程所需能量称为电离能。对于光子和原子作用而使原子电离时，不再受式（1-1）的限制。这是因为原子一旦电离，原子结构即被破坏，因而不再遵守有关原子结构的理论。当原子吸收的能量等于电离能时，原子恰被电离；若吸收的能量大于电离能，原子被电离，且电离出的电子具有动能，其动能等于吸收的能量与电离能的差值；若吸收的能量小于电离能，则不会发生电离现象[3,5]。

3. 自发辐射、受激辐射和受激吸收

爱因斯坦从辐射与原子相互作用的量子论观点出发提出光与物质有三种相互作用的基本形式：自发辐射、受激辐射和受激吸收。

1）自发辐射

处于激发态的原子是不稳定的，常在没有任何外界作用的情况下，自发地通过发射光子或其他形式放出能量跃迁到低能态，如图 1-2 所示。处于高能态 E_2 的原子向低能态 E_1 跃迁，根据能量守恒原理，在跃迁过程中辐射出能量为 $h\nu=E_2-E_1$ 的光子，这一过程称为**自发辐射**。自发辐射是一种随机的发射过程，各原子都是自发地、独立地进行，因而各光子的发射方向和初相位都不相同。此外，由于大量原

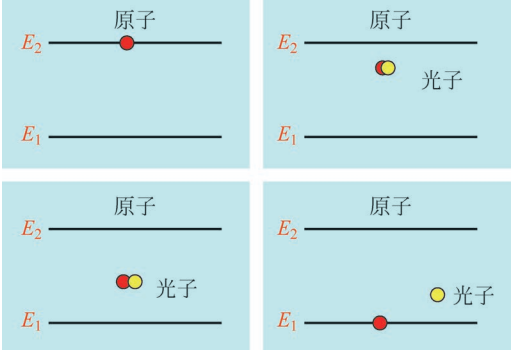


图 1-2　自发辐射过程示意图

子所处的激发态不尽相同，所以发出光子的频率也不相同。普通光源发光就属于自发辐射，所以普通光源发的光没有相干性。资料中也用图 1-3 来说明自发辐射过程。

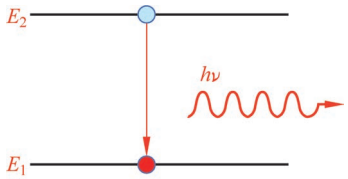


图 1-3　自发辐射过程

2）受激辐射

受激辐射的概念是爱因斯坦在推导普朗克的黑体辐射公式时提出来的。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。受激辐射是指处于激发态 E_2 上的原子，受外来光子的作用，当外来光子的频率正好与它的跃迁频率一致时，它就会从 E_2 能级跃迁到 E_1 能级（高能级跳到低能级），根据能量守恒原理，同时辐射出与外来光子完全相同的两个光子，并满足 $h\nu=E_2-E_1$。新发出的光子不仅频率与外来光子一样，而且发射方向、偏振态、相位和速率也都一样。于是，一个光子变成了两个光子，这个过程如图 1-4 所示，也可用图 1-5 来说明。

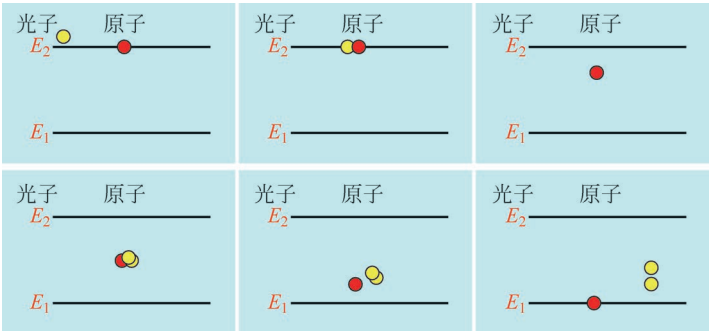


图 1-4　受激辐射过程示意图

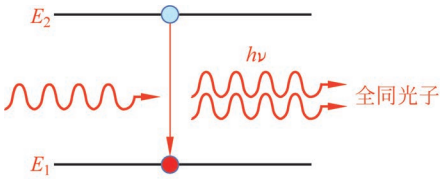


图 1-5　受激辐射过程

入射一个光子引起一个激发原子受激跃迁，在跃迁过程中，辐射出两个同样的光子，这两个同样的光子又去激励其他激发原子发生受激跃迁，因而又获得四个同样的光子。如此反应下去，在很短的时间内，如果高能态的原子数足够多，就可以辐射出来大量同模样、同性能的状态完全相同的光子，这个过程称为雪崩。雪崩是受激辐射光的放大过程，光的受激辐射过程就是产生激光的基本过程，如图 1-6 所示。受激辐

射光是相干光，相干光有叠加效应，因此合成光的振幅加大，表现为光的高亮度性。

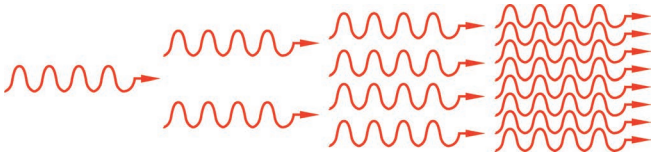


图 1-6　光的放大示意图

3）受激吸收

受激吸收与受激辐射的过程正好相反，是指处于低能级 E_1 上的原子受到外界的作用，如受到别的原子的撞击或者吸收一定能量的光子，也有可能跃迁到高能态，如图 1-7 所示。处于低能态的原子，吸收了一个能量恰好为 $h\nu=E_2-E_1$ 的光子，从而跃迁到能量为 E_2 的激发态，此过程称为**受激吸收**。这就是一般的物质对光有一定吸收的原因。

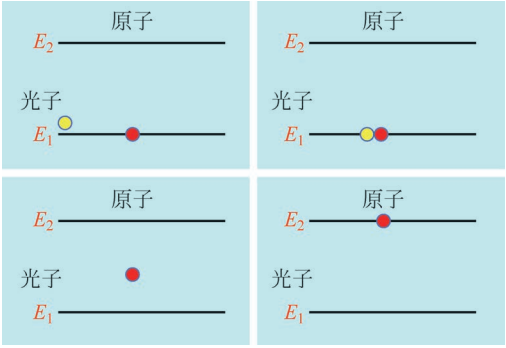


图 1-7　受激吸收过程示意图

自发辐射过程中每一个原子的跃迁是自发的、独立进行的，其过程全无外界的影响，彼此之间也没有关系，只与物质本身的性质有关，而且它们发出的光子的状态是各不相同的，这样的光相干性差，方向散乱。而受激辐射则相反，最大的特点是由受激辐射产生的光子与引起受激辐射的原来的光子具有完全相同的状态，具有相同的频率、相同的方向，完全无法区分出两者的差异。这样，通过一次受激辐射，一个光子变为两个相同的光子。这意味着光被加强了，或者说光被放大了。某原子自发辐射产生的光子对于其他原子来说是外来光子，会引起受激辐射与吸收，因此三个过程在大量原子组成的系统中是同时发生的。

4. 粒子数反转

1）粒子数反转的概念

在一般的热平衡状态下，物质各能级的粒子数按照玻尔兹曼统计分布，即[6]

$$\frac{n_2}{n_1}=\mathrm{e}^{\frac{-(E_2-E_1)}{kT}} \tag{1-2}$$

其中，n_1 和 n_2 分别为低能级 E_1 和高能级 E_2 上的粒子数，E_1 和 E_2 分别为低能级和高能级的能量，k 为玻尔兹曼常数(1.38×10^{-23} J/K)，T 为绝对温度(K)。

因为 $E_2>E_1$，$h\nu>0$，$T>0$，则两能级上的原子数之比：

$$\frac{n_2}{n_1}=\mathrm{e}^{\frac{-(E_2-E_1)}{kT}}<1 \tag{1-3}$$

即 $n_2<n_1$，表明在热平衡状态下高能级上的粒子数总是小于低能级上的粒子数，且两者的比例取决于体系的温度。一般地，在热平衡状态下，几乎所有的粒子都处于最低能态——基态，只有少数粒子处于较高的能级状态——激发态，所以受激吸收占主导地位。这种 $n_2<n_1$ 的分布称为粒子数的正常分布，如图 1-8(a)所示。

由于 $E_2>E_1$，故 $n_1>n_2$，即在热平衡条件下，高能级的粒子数始终少于低能级的粒子数。若有一束频率为 ν 的光通过物质时，所吸收的光子数将恒大于受激发射的光子数。因此，处于热平衡条件下的物质无法实现受激辐射的放大，这种情况得不到激光。要实现光放大，得到激光，就必须打破原子数在热平衡下的玻尔兹曼分布，使高能级 E_2 上的粒子数大于低能级 E_1 上的粒子数，因为 E_2 上的粒子多，能够发生受激辐射，使光增强。为了达到这个目的，必须设法把处于基态的粒子大量激发到 E_2，处于高能级 E_2 的粒子数就可以远远超过处于低能级 E_1 的粒子数，形成 $n_2>n_1$ 的分布，这种分布与粒子数的正常分布相反，称为粒子数反转分布，简称粒子数反转，如图 1-8(b)所示。

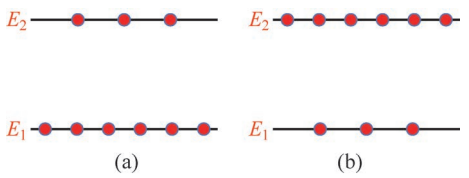


图 1-8　粒子数分布示意图

(a) 粒子数正常分布($n_2<n_1$)；(b) 粒子数反转分布($n_2>n_1$)

注意：粒子数反转分布只有在非平衡状态下才能达到；实现粒子数反转分布是产生激光的必要条件[1]。

2) 粒子数反转的实现

爱因斯坦 1917 提出受激辐射，激光器却在 1960 年问世，相隔 43 年，主要因为普通光源中粒子产生受激辐射的概率极小，即在热平衡条件下粒子数大多处于最低能态。因此，如何从技术上实现粒子数反转是产生激光的必要条件。理论研究表明，任何工作物质，在适当的激励条件下，可在粒子体系的特

定高低能级间实现粒子数反转。能够实现粒子数反转的介质称为激活介质或增益介质。

因此，要实现粒子数反转并产生激光，必须做到：①要求介质有适当的能级结构（内因），作为工作物质的微观原子必须要有一个原子可以停留较长时间的能级，这些能级通常称为亚稳态。在亚稳态上，原子辐射跃迁被禁止或这种跃迁概率很小，所以原子停留的时间比较长，容易积聚足够多的原子，从而相对于低能级上的原子实现粒子数反转。②要有必要的能量输入系统使受激辐射远大于自发辐射（外因），工作物质吸收外场能量后，处于高能级的原子数要大于低能级的原子数，实现这一状态的过程称为抽运或激励过程。这种激励过程，犹如用水泵将低处的水抽运到高处，所以通常又把这些提供激励的能源系统称为泵浦。泵浦的方法有光照（光泵）、放电（电泵）、化学反应（化学泵）等。

粒子数反转的实现过程如图 1-9 所示。提高泵浦将大量低能态 E_1 上的原子抽运到激发态 E_3 上，由于 E_3 能级的寿命（原子停留时间）很短，大量原子通过自发辐射跃迁到亚稳态能级 E_2 上，亚稳态 E_2 的寿命较长，自发跃迁的概率也很小，如果光抽运的强度足够大，就可以使处于 E_2 状态的原子数 n_2 超过处于 E_1 状态的原子数 n_1，并达到 $n_2>n_1$，从而在能级 E_1 和 E_2 之间实现粒子数反转。具有这样原子数分布的发光体系在外来光子诱导下就可以产生激光。

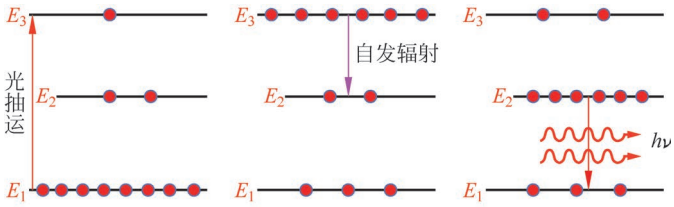


图 1-9　粒子数反转的实现过程示意图

一般情况下，对能够实现粒子数反转的能级结构也有一定要求，简单的能级结构很难实现粒子数反转，大都采用比较复杂的多能级结构。

1.1.2　产生过程

激光工作物质在泵浦源的激励下被激活，即介质处于粒子数反转状态，在粒子数反转分布的两能级之间，由自发辐射过程产生很微弱的特定频率的光辐射。在自发辐射光子的感应下，在上下两能级间产生受激辐射。这种受激辐射光子与自发辐射光子的性质（频率、相位、偏振、传播方向）完全相同，由这些光辐射在介质中产生连锁反应，由于谐振腔的作用，这些光子在腔内多次往返经过介质，产生更多的同类光子。由于受激辐射的概率取决于粒子数反转密度和介质中的同类光子密

度,因此就可能使同类光子的受激辐射成为介质中占绝对优势的一种辐射,从而从光学谐振腔的部分透射镜端输出光能,这就是激光,如图 1-10 所示。

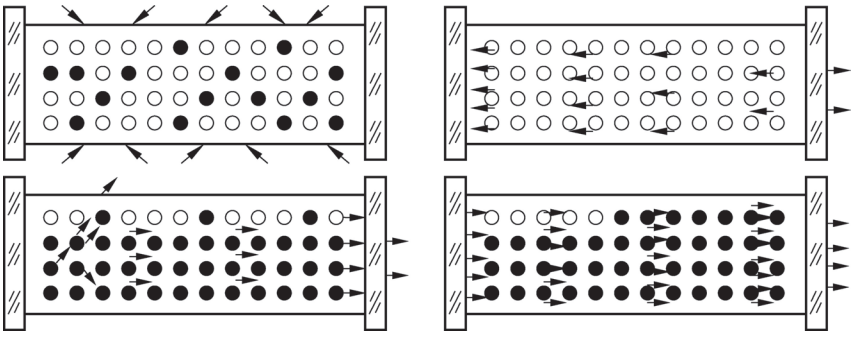


图 1-10　激光振荡示意图

1.1.3　特点

激光是强相干光源,与普通光相比具有四大特点。

1) 亮度高

亮度是衡量一个光源质量的重要指标,由于激光的发射能力强和能量的高度集中,所以亮度很高。若将中等强度的激光束经过会聚,可在焦点处产生几千摄氏度到几万摄氏度的高温,如图 1-11 所示。

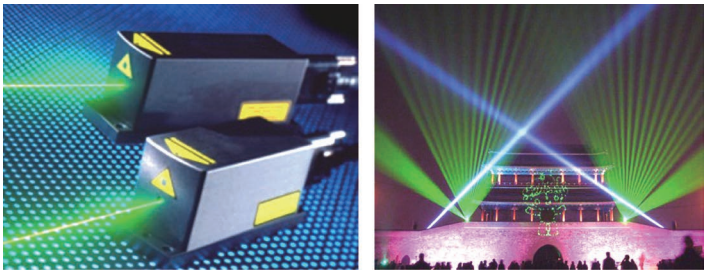
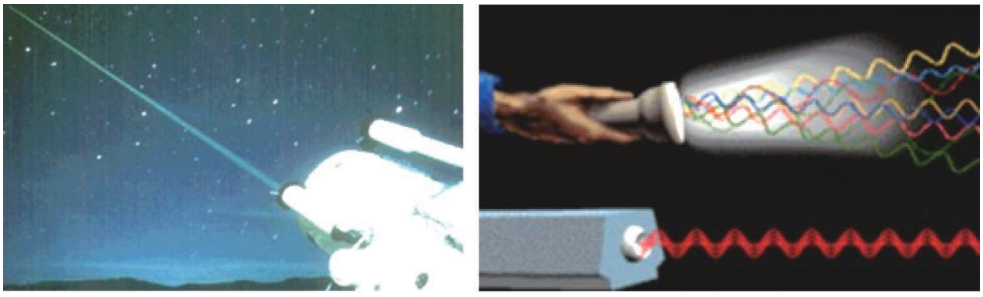


图 1-11　高亮度的激光束

2) 方向性好

激光的光束狭窄,并且十分集中,发射后发散角非常小,所以有很强的威力。激光射出 20km,光斑直径只有 20～30cm,激光射到 38 万千米的月球上,其光斑直径还不到 2km,如图 1-12(a)所示。相反,普通光分散向各个方向传播,所以强度很低,如图 1-12(b)所示。



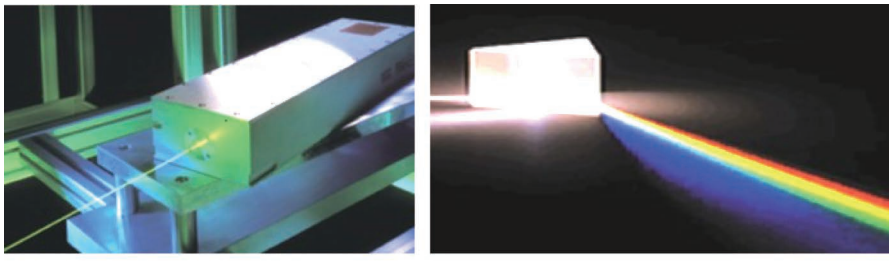
(a)　　(b)

图 1-12　方向性好的激光与普通光对比

（a）激光；（b）普通光

3）单色性好

光的颜色由光的波长决定，不同的颜色，是不同波长的光作用于人的视觉而反映出来的。激光的波长基本一致，谱线宽度很窄，颜色很纯，单色性很好。这与普通的光不同，例如阳光和灯光都是由多种波长的光合成的，接近白光。由于单色性好，激光在通信技术中应用很广，如图 1-13 所示。



(a)　　(b)

图 1-13　单色性好的激光束

（a）激光；（b）普通光

4）相干性好

相干性是所有波的共性，但由于各种光波的品质不同，导致它们的相干性也有高低之分。在日常生活中所见的普通光源发出的光在不同方向、不同时间里都是杂乱无章的，它们的相位和偏振是随机的，是自发辐射光，不会产生干涉现象，因而只能用作普通照明。普通光经过透镜后也不可能会聚在一点上。而激光是受激辐射光，所有光子都有相同的相位，相同的偏振，具有极强的相干性，它们叠加起来便产生很大的强度，称为相干光，如图 1-14 所示。

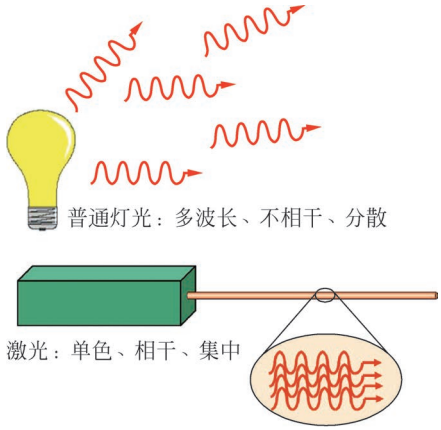


图 1-14　普通灯光与激光的相干性比较

1.2　激光模式

光在激光谐振腔中振荡的特定形式称为激光模式，包括纵模和横模两种。前者代表激光器输出频率的个数，后者代表激光束横截面的光强分布规律。根据模的数目，纵模又分为单纵模和多纵模；横模也可分为基模和高阶模。

1.2.1　纵模

光束在激光谐振腔内往返传播时，入射波和反射波会叠加，只有那些叠加相长的波才能“生存”下来，即只有特定波长的光(满足驻波条件式(1-4))才能形成稳定振荡，这样谐振腔会选出一些不连续的特定波长的光，即纵模。简言之，纵模是光场沿谐振腔纵向传播的不同振动模式——不同频率的驻波。

谐振腔满足驻波条件的频率成分：

$$\nu_j = j\,\frac{c}{2nL} \tag{1-4}$$

其中，L 为腔长；n 为激活介质的折射率；j 为腔内的波腹数，$j=1,2,3\cdots$。

如果谐振腔足够短，仅仅是所有波长中某一特定波长的整数倍，那么就只有这一特定波长的光子得以谐振成为优势波长，激光器会输出真正的单色光，这就是**单纵模**。但实际的谐振腔通常都比较长，在受激辐射的波长范围内，可能同时是好几个波长的整数倍，因此会有好几种波长都得到谐振，这样的激光器就会输出好几种波长的光(由于受激辐射带宽本身很窄，所以这几个波长也非常接近)，这就是**多纵模**。