



激光及其应用

JIANG JI QI YING YONG

端如

湖南科学技术出版社

激光及其应用

黄瑞如

*

湖南科学技术出版社出版

湖南省新华书店发行

衡阳印刷厂印刷

*

1979年5月第1版第1次印刷

字数: 3.4万 印数: 1—20,000册 印张: 2

统一书号: 13204·1 定价: 0.14元

编 辑 说 明

向广大工农兵和青少年普及科学知识，对提高整个中华民族的科学文化水平、加速实现四个现代化，具有十分重要的作用。为此，我们编辑了《科学知识普及小丛书》。

这套小丛书应该根据新时期总任务的需要，紧密结合三大革命斗争实践，用辩证唯物主义和历史唯物主义的观点和方法，着重介绍自然科学的基础知识和科学技术发展的新成就，做到题材力求广泛一点，内容力求简明一点，文字力求通俗一点，这就是我们编辑这套小丛书的指导思想。

编辑出版这样的科普读物，我们缺乏经验，希望广大读者经常给我们提出宝贵意见。

目 录

一、光与激光	(1)
光究竟是什么?	(2)
光是怎样产生的?	(5)
激光的形成	(9)
二、激光器是一种新型光源	(14)
激光的高方向性	(16)
激光的高亮度	(18)
激光的高单色性	(22)
激光的高相干性	(24)
三、激光的应用	(28)
激光核聚变	(29)
激光分离同位素	(31)
激光通讯	(33)
全息照相	(38)
激光在机械加工方面的应用	(46)
激光在农、医方面的应用	(48)
激光精密计量与测量	(51)
激光光谱学	(53)
激光化学	(54)
激光在军事上的应用	(55)

激光技术是六十年代兴起的最活跃的新技术之一。从1960年用红宝石制成世界上第一台激光器以来，尽管它的发展历史还不到二十年，但它已跑在当代科学技术发展的前列，已成为一门具有强大生命力和巨大应用潜力的新兴技术学科。现在已发现可产生激光的工作物质达数百种。所辐射谱线有上千条(遍及红外光、可见光、紫外光)。激光功率已超过万亿瓦。激光器有连续运转的，有短至几万亿分之一秒脉冲运转的。激光器的规模有的十分庞大，小的如同豆子那样大。激光器的应用范围遍及国防、宇宙、通讯、工农业、医疗卫生等等。它的出现促进了物理学、生物学、化学等学科的发展，是继本世纪量子物理学、无线电技术、原子能技术、半导体技术、电子计算机技术之后的又一重大科学技术新成就。它的出现，标志着人类掌握和利用光波进入了一个崭新的阶段。然而，什么是激光？激光是如何形成的？它有哪些优异的特性？为什么有这样一些特性？本文将作初步讨论，并简介激光的应用。

一、光 与 激 光

光与人类的关系如同空气与生命关系一样密切。早

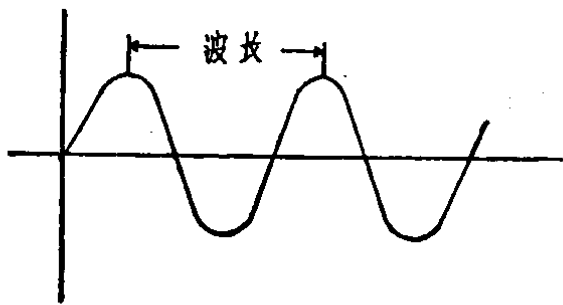
• 1 •

晨，旭日东升，光芒万丈；夜晚，满天星斗，闪闪发光。是光，装饰得大自然明亮鲜艳，万紫千红；没有光，世界将是漆黑一团。

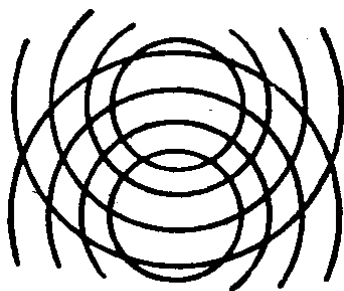
光究竟是什么？

对于光的本性的认识，通过几个世纪的实践、认识，再实践、再认识，人们的认识不断深入，不断完善。但是，我们对光的认识还是处在发展之中。

光在传播过程中体现了光的波动性。什么是波动性？我们可以联想水波、声波。耳朵听到的是声波。收音机、电视机接受的是无线电波。我们最直观的还是水波。往平静的河面投入一块石头，水面则产生波浪，一起（称波峰）一伏（称波谷）地向四周传播。两相邻的波峰或波谷之间的距离叫“波长”（图一），这种扰动的传播过程，称为波。



图一

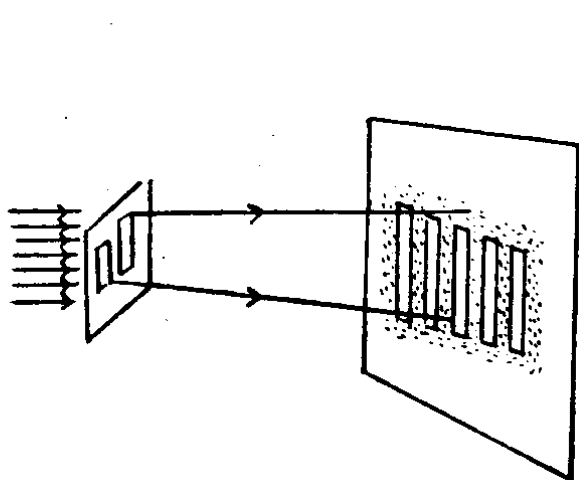


图二

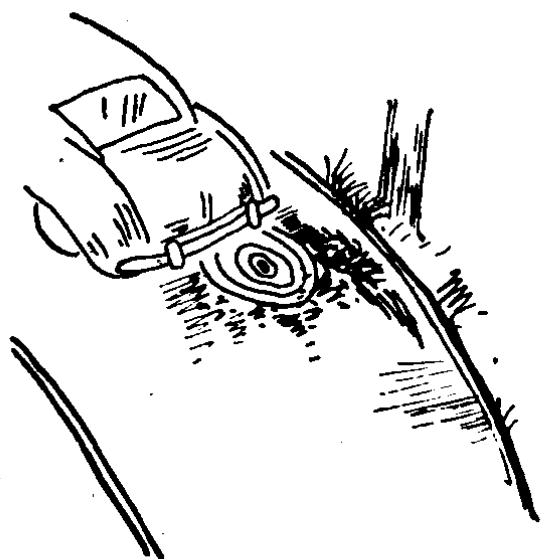
我们最关心且最重要的是两列完全相同的波的迭加（图二），在迭加区内出现了这样的现象：在某些地方振

动始终加强，在另一些地方振动始终减弱或抵消，此称波的干涉现象。

干涉现象是一切波动的共同特征之一。要检验光是不是波，就必须通过实践来观察它的干涉现象。远在1802年，杨氏最先以明确的形式表述了光的干涉现象。从图三可以看出，所谓光的干涉，就是从同一光源发出



图三



图四

的二列光波，在光波的迭加区出现明暗相间的干涉花样。又如在润湿的路面上，我们常常见到废油落在上面而形成彩色环状条纹(图四)，这是光的干涉现象；肥皂泡上呈现的彩色花纹，也是光的干涉现象；煤块上的彩色，禽类羽毛的彩色等，都是光的干涉现象。所有这些光的干涉现象，充分说明了光的波动性。理论和实践还进一步证明了：光是一种电磁波。在本质上，光波和无线电

波一样,但是光波的波长比无线电波的波长短得多。人眼是特殊的接收器。我们感觉到的不同颜色的光正是不同波长的光波作用在人眼视网膜上引起的不同反映(如下表)。当眼睛同时感觉到表中某些不同波长的电磁波时,就产生白光的印象,所以白光是复合光,而任何一定波长的光称单色光。

光的颜色	波长范围(单位: 埃 = 10^{-8} 厘米)
红 光	7700—6400
橙 光	6400—6000
黄 光	6000—5800
绿 光	5800—5000
青 光	5000—4500
蓝 光	4500—4300
紫 光	4300—4000

另一方面,在光与物质的相互作用等现象中,又体现了光的粒子性,光源发出的光是一粒一粒以光速 C 运动的粒子流,这些光粒子称为光量子,简称光子。每一个光子都具有一定的能量。光的频率愈大,光子的能量也愈大,光子的能量与频率的关系是:

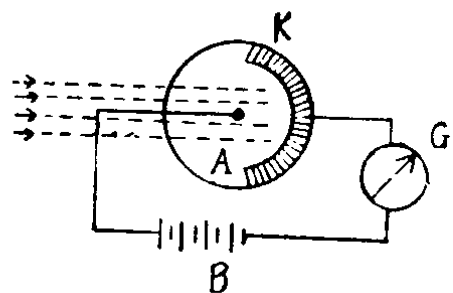
$$\epsilon = h\nu$$

式中 ϵ 是每个光子的能量,它的单位用尔格, ν 是光的频率,单位用赫芝(周/秒), $h = 6.624 \times 10^{-27}$ 尔格·秒。例如红光光子能量为:

$$\begin{aligned} h\nu &= 6.624 \times 10^{-27} \times 3.9 \times 10^{-4} \\ &= 2.6 \times 10^{-12} \text{ 尔格,} \end{aligned}$$

显然,这是一个非常小的量。这种光量子理论在光电现

象(图五)中得到很好的证明。图中玻璃圆球是个真空光电管，阴极k涂有感光层，用电池组使阳极A、阴极k保持一电位差。当用光照射阴极k时，电路中立即产生了电流，这就是通常说的光的照射下而释放电子的光电效应。只有用光量子理论才能准确的解释光电效应：光以微粒的形式被金属的自由电子吸收，电子吸收光子后得到能量，从而逸出金属表面形成光电流。



图五

综上所述，光的波动说和光的量子说都有其实实验依据。通常认为，把这两个完全不同的概念统一起来似乎是不可能的，然而在光学现象中波动性和粒子性的不可克服的矛盾却是自然辩证法的一种表现，真实的矛盾的统一，这种统一性从公式 $\epsilon = h\nu$ 的关系中也可看出，等式右边 ϵ 表示光子的能量，左边 ν 是波动的特征量，两种性质通过常数 h 联系起来了。光具有波和微粒的这种性质，称光的波粒二象性。然而，这种对光的本性的认识还远远没有达到最后的境界，这种逐步接近真理的过程，反映着人类的认识运动是无止境的。

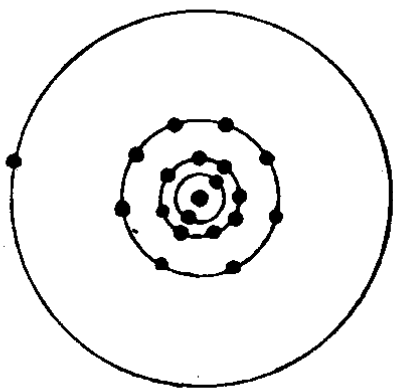
光是怎样产生的？

发光的物体统称之为光源。太阳，是天然光源；日

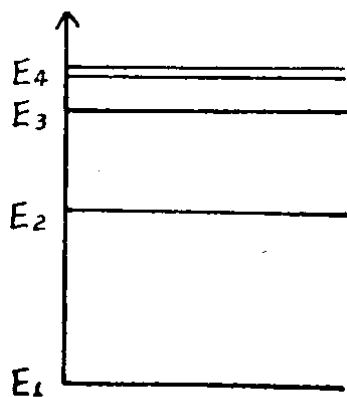
光灯、白炽灯、霓虹灯、煤油灯、汞灯和氙灯等，是人造光源；此外，荧光物质也可发光。这些光是怎样产生的？大家都知道，物质都是由原子组成的，物质发光，总的说都是原子内部内能的转换，所以，要了解发光现象首先对原子结构要有个大概的了解。

原子的能级

原子由原子核和电子组成，在原子中心有个又重又小的原子核，电子围绕着原子核不停地运动，而且只能沿着某些可能的轨道运转(图六)。当电子在不同轨道上



图六



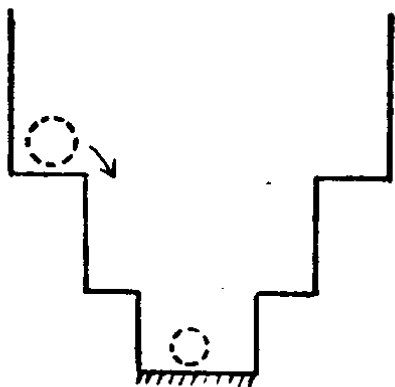
图七

运动时，我们就说原子处于不同的状态，每一状态中的原子都具有确定的能量。由于电子绕核运动的轨道是分立的，不连续的，就是说原子状态是不连续的。我们形象地用能级图表示(图七)，图中 $E_1, E_2 \dots$ 表示原子的能量状态，愈是上面的能级表示原子的能量愈高。最低的能级 E_1 称基态。 $E_2, E_3 \dots$ 等称激发态。

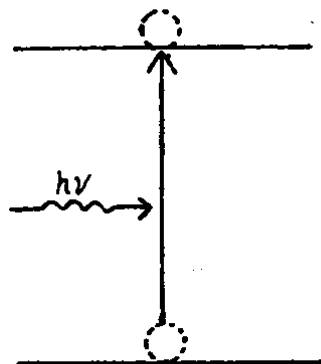
必须指出：这些能级是原子可能具有的能级，每一个原子在某一时刻只能处于某个能级，而一个发光的光源内所包含的原子数目是巨大的，虽然每个原子可以处在各种不同的能量状态，但原子处在最低能级则最稳定，这如同一个小球放在下层比放在台阶上更稳定一样（图八），所以，在正常情况下，处于低能级的原子数一般多于处于高能级的原子数。而且激发能级愈高，处于这个能级的原子数愈少。这就叫作原子在能级上的正常分布。

跃迁和发光

在正常分布状态下，原子多处于稳定的低能态。如果没有外界的作用，原子可以长期保持这种状态。要使原子发光，首先要在外能的作用下给原子一定的能量，原子也就相应的从低能级跃迁到高能级。这过程叫激发（图九）。



图八

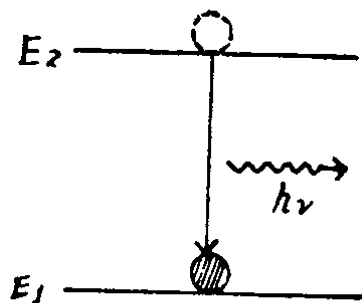


图九

原子处在高能级是不稳定的，会自发地向低能级跃迁。原子从高能级跃迁至低能级时，内能降低了，多余的能量以光的形式释放出来，这就是物质的发光(图十)。

原子从高能级向低能级跃迁，发出的光子频率决定于这两个能级之间的能量差：

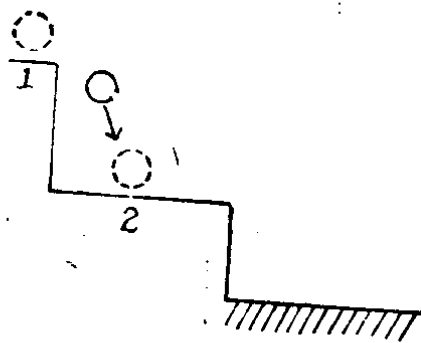
$$h\nu = E_2 - E_1$$



图十

我们熟知的白炽灯、日光灯、汞灯、氙灯、霓虹灯以及火焰等，统统都是这种发光过程。我们把这种从高能级自发向低能级跃迁的发光过程叫作自发辐射。

在这里，我们更感兴趣的是另一种发光过程。这就是处在高能级上的原子，在外来光的诱发下，跃迁至低能级而发光，这不同于自发辐射，而把它叫做受激辐射。举个例子就更容易明白了：在图十一中，小球被提高到台阶“1”时，是非常不稳定的，它随时都会往下落，我们把这种跃迁比喻为自发跃迁；若小球被提高到台阶“2”时，小球比在位置“1”稳定多了，一般说不会自发的往下落，在这情况下再用另外一个小球去碰撞在台阶“2”



图十一

上的小球，在碰撞后两个小球都往下落，这比喻为原子中的受激辐射过程。

请注意：不是任何外来光都能引起受激辐射，只有当外来光子的频率等于激发态原子的某一固有频率时，才能引起受激辐射，也就是说当外来光子的频率恰恰符合：

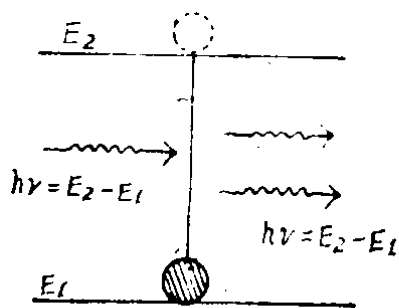
$$h\nu = E_2 - E_1$$

这时，处于激发能级 E_2 的原子在外来光子的激励(感应)下而发光。而且发出的光子与外来光子有完全相同的特征：频率相同，光的传播方向相同，光的振动方向相同。简单的说，一个光子放大为二个光子，这种光放大称受激辐射(图十二)。

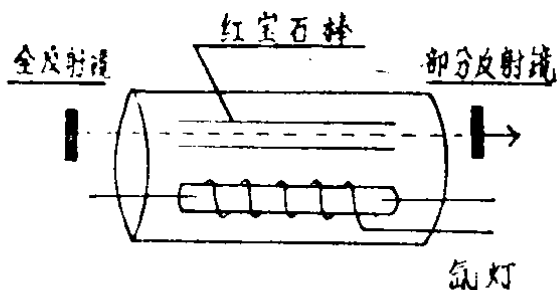
受激辐射是产生激光的重要基础。从发光的内部机制看，上面提到的各种普通灯的发光都是自发辐射。而激光是受激辐射。

激光的形成

普通光源的发光只要有某种能量补给就可以维持光



图十二

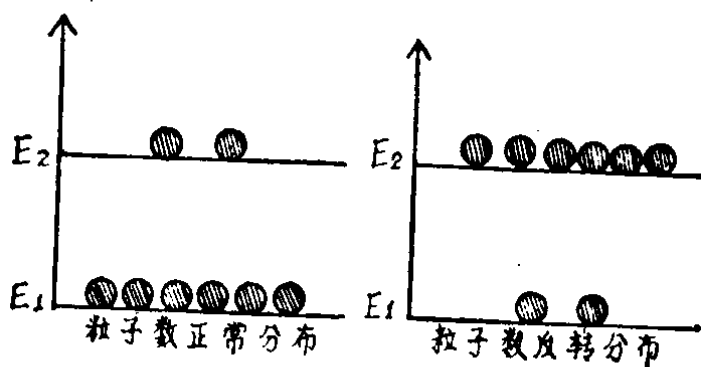


图十三

的发射，如钨丝白炽灯只要钨丝通电维持一定的温度，就可以持续地发光。汞灯、日光灯靠电场来补给能量维持发光。激光的发光过程要复杂得多。一般说，激光器都有三个基本组成部分：工作物质；激励能源；谐振腔。现以红宝石激光器为例(图十三)，图中所示红宝石棒为激光的工作物质，氙灯是激励能源，两端装的全反射镜和部分反射镜组成谐振腔。下面我们分别讨论它们的作用。

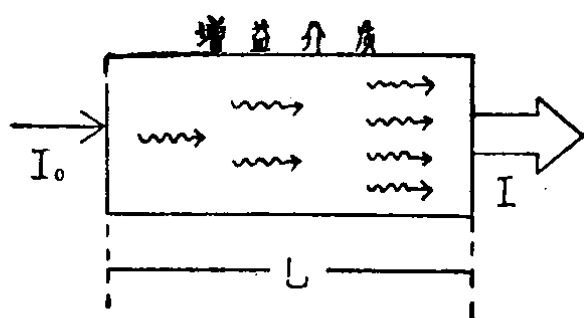
形成激光，工作物质要满足什么条件？

原子在能级上正常分布的条件下不可能产生激光，因为这时大多数原子都处在低能级上。而且在外来光的激发下原子会从低能级跃迁到高能级形成吸收过程，我们说在这种情况下吸收占主要地位。如果要使受激辐射占优势，首先必须利用某种方法，使原子在某高能级的数目多于低能级上的数目，相对于正常分布说这叫做粒子数反转分布(图十四)，当激光工作物质内的原子实现

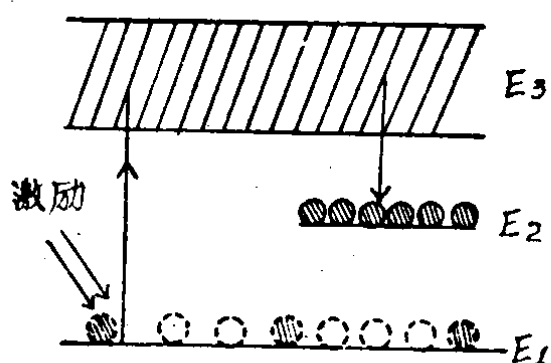


图十四

了这种反转分布,则在这两个能级之间受激辐射占优势。光在这种物质中传播时,就会变得越来越强。所以,把这种处于粒子数反转分布的工作物质称增益介质。当光通过增益介质时受激辐射占优势,因而光被增强了(图十五)这样看来形成激光的先决条件是使工作物质内原子在能级上形成粒子数反转分布。怎样使它形成反转分布?显然,必须用外界能量,使大量处于低能级的原子跃迁到某高能级上去,激光器中的激励能源就是起这种作用的,仍以红宝石激光器中的工作物质为例(图十六),红宝石晶体的基质是 Al_2O_3 , 掺入重量百分比约为0.05%的铬离子 Cr^{3+} , 晶体中形成激光的是铬离子 Cr^{3+} , Cr^{3+} 能级示意图如图十六所示,在正常分布中,粒子多数处于低能级 E_1 , 当脉冲氙灯——激励能源以足够强的光照射红宝石棒时,大量粒子被激发到吸收带 E_3 , E_3 能级不稳定,通常说激发态能级寿命短(例如亿分之一秒),如上所述会自发的跃迁至低能级,如跃迁到 E_2 , E_2 称亚



图十五

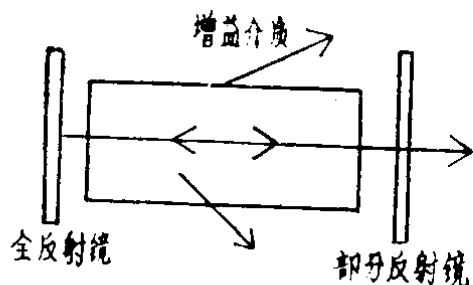


图十六

稳定能级，相对的说能级寿命长(例如千分之一秒)，所以 E_2 能级比 E_3 能级稳定，比 E_1 能级不稳定，故把 E_2 称为亚稳能级。在激光工作物质中就是利用亚稳能级来实现粒子数反转分布的。当外来能量足够强时，处于基态的原子向 E_3 能级跃迁， E_3 能级不稳定，很快地自发地向下跃迁，当跃迁到 E_2 能级时，由于 E_2 能级寿命长(读者注意：比 E_1 能级寿命可以长十万倍)，就是说比较稳定，在这个时间范围内在能级 E_2 上可积累大量的粒子。只要激励能量足够强，甚至可在千分之几秒的时间内把一半以上的粒子数激发到 E_3 并转移到 E_2 上，从而形成 E_1 、 E_2 之间的粒子数反转分布。这种工作方式如同水泵抽水，将水从低处抽运到高处，所以激励又称泵浦，或称抽运。泵浦源可以是各种各样的，随激光工作物质而异。如固体激光器多采用“光泵”；气体激光器多采用“电泵”(气体放电激励)；半导体激光器多采用注入大电流的方法激励；还有化学激励，热激励，电子束激励，核激励，激光激励等各种形式的激励能源。实际上激光能量就是激励能量转换而来的。普通光源的发光同样需要外界能量补给，维持光发射，在这一点上有相似之处，但它们的本质区别在于激光的工作物质必须借激励能源形成粒子数反转分布，对普通光源的发光就不需要了。

必须再次指出，工作物质实现粒子数反转分布以后，

只有符合 $h\nu = E_2 - E_1$ 条件的外来光子才是增益介质,才能形成受激辐射,使光放大。然而,产生了受激辐射,光放大了,是不是就形成了激光?一般来说,还不足以形成强的激光束,还必须使光在谐振腔中产生振荡放大。下面我们讨论一下谐振腔的作用(图十七),以两块平面平行反射镜组成的谐振腔为例,当原子发出的光子不是沿谐振腔轴方向传播时,则光穿出工作物质,一去不复返了。只有沿腔轴方向传播的光子在碰到镜片后被反射折回,经两个反射面的反射往返运行,在运行中不断地碰撞处于激发能级的原子,形成受激辐射,这样,沿轴线方向的光子数不断增加,形成雪崩式的放大,这就等于反复利用了工作物质,充分发挥了它的放大能力,从而形成了强大的受激辐射光。



图十七

还要指出:光在谐振腔内来回反射时,反射镜的作用如同提供了“正反馈”,起了反馈放大的作用,但是,另一方面,由反射镜(和其他原因)还会引起光的透射、衍射、吸收、散射等,从而形成光损耗。在激光器中要维持稳定的来回光振荡,必须使光在工作物质中来回一次所产生的增益足以补偿损耗,这是形成激光的必要条件。