

毛主席语录

一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。

科技專題參考資料

激 光 (2)

大功率二氧化碳激光器

1971年7月

中国科学技术情报研究所重庆分所

前 言

本论文集的中心内容是大功率二氧化碳激光器。

二氧化碳激光器自1964年出现之后，几年来获得了很大的进展。连续功率平均每年都有数量级的增长，现有二氧化碳气体动力激光器，已获得几万瓦以上的连续红外输出功率。据报道，用中等功率水平的二氧化碳激光束集中到战术导弹头部一块很小的面积上，照射不到1秒，就把它打成碎片。这种激光器现在采用了三种激励方法：起初采用放电激励，后来还应用了热激励（包括动力学方法所实现的热激励）和化学激励的方法。

看来，气体动力激光器和化学激光器，在获得大能量激光输出方面是很有前途的。

这里收集了有关大功率二氧化碳激光器的一些论文资料。因为我们活学活用毛主席著作不够，业务水平和外文水平低，编译工作中一定存在许多缺点和错误。尽管如此，仍将这些资料编印成册，希望它对于革命读者有所裨益。同时，热切地盼望读者来信提出宝贵意见。

伟大领袖毛主席教导我们：“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。”广大的工农兵群众和革命的科技工作者坚决响应毛主席的这一伟大号召，独立自主，自力更生，破除迷信，解放思想，奋发图强，艰苦奋斗，一定会在激光科研战线上赶超世界先进水平，为中国革命和世界革命作出贡献。

重 庆 市 2314 信 箱

中国科学技术情报研究所重庆分所

1971 年 7 月

目 录

前 言

激光器的基本原理	(1)
大功率二氧化碳激光器	(8)
二氧化碳激光器	(19)
大功率气体激光器	(42)
流动 $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He-H}_2\text{O}$ 激光器中分子组成的变化	(70)
用加热和冷却系统的方法获得负温度	(75)
气体混合物绝热膨胀时的集居数反转	(77)
激光器的热激励方法	(78)
二氧化碳气体动力激光器实验	(85)
在拉瓦尔喷管的超声速气流中获得分子的集居数反转	(88)
“火箭”式二氧化碳激光器输出 6 千瓦	(98)
化学激光器	(100)
HF 和 DF 连续波化学激光器的比较	(129)
横向流动的 DF- CO_2 纯化学激光器的工作特性	(133)

激光器的基本原理^{*)}

一、引言

“自然科学是人们争取自由的一种武装。……人们为着要在自然界里得到自由，就要用自然科学来了解自然，克服自然和改造自然，从自然界里得到自由。”（毛主席语录，第一七五页）

人们在生产斗争和科学实验的实践过程中，逐步地了解自然，掌握自然的规律性。人们根据对于客观外界的规律性的认识，提出各种设想，反复地进行科学实验。在科学实验的过程中，撤开一些因素，控制一些因素，增添一些因素，去掉一些因素，有可能获得以前尚未观察到的实验现象。这些现象在自然界里也许是很难观察到和很难发生的。人们利用这些现象制成各种装置，来满足自己的各种需要。

激光的出现正是这种情况。

在自然界和日常生活中，经常碰到各种发光现象，如炽热物体的发光（白炽灯丝），物质燃烧时的发光，气体放电时的发光（高压水银灯，霓虹灯），以及荧光物质的发光（萤光屏）等等。所有这些光源，发光亮度不强，光线向四面八方散开，而且包含着各种颜色的光。

由于实际的需要，生产技术的发展，人们根据许多学科（如原子物理学，光学和光谱学，无线电波谱学以及量子电子学等）的研究成果，预言了有可能安排一定的外界条件，控制微观世界的发光机构，获得一种完全新型的光源。1960年，人们实现了这种预言和愿望，研制成功了新型光源，这就是激

光器。在最近十年内，它获得了飞速的发展，受到人们广泛的重视。

与普通光不同，激光器所发出的光——激光具有极高的光源亮度，其数值为太阳表面亮度的100亿倍以上。例如，现有的高功率激光束，足以把数百米以外的装甲板击穿。激光的方向性很强，它比现今最好的探照灯系统的发射角小几百倍。激光束从地面射向月球，在月球表面散开的面积的直径也不过几公里。可以说激光是单一颜色的光，具有极高的单色性和相干性。所有这些特点，无疑会使它在各个领域中得到极为广泛和极为重要的应用。

为什么激光具有这样十分特殊的性质呢？

发光现象是物质的一种运动形态。物质是无限可分，不可穷尽的。从微观世界的基本粒子到宇宙世界的总星系（银河系和河外星系），分为无限多的层次。物质各个层次的运动有着质的差别。物质的发光现象，主要是由分子、原子以及原子（分子）的外围电子的运动变化所决定的。因此，为了了解物质的发光性质（特殊地说，激光的性质），有必要考察一下这些微观粒子的运动情况。

二、能级和能级之间的跃迁

我们知道，各种物质都是由微观粒子（电子，原子，分子等）组成的。组成物质的微观粒子处在不停的运动状态，具有一定

^{*)} 本文系编写。

的能量。物质的发光现象，就是微观粒子的内能转化为光能的过程。

对于物质微观状态的深入研究表明，微观系统只在某些特殊的状态下才是稳定的，这些稳定状态一般相应于系统能量 E 的某些分立（不连续）的值。简单地说，在大多数情况下，微观粒子所具有的能量是不连续的，只能取某些分立的值。

“一切过程的常住性是相对的，但是一种过程转化为他种过程的这种变动性则是绝对的。”（毛泽东选集，第三〇六页）微观粒子不能永远停留在一个稳定状态上。它会从一个稳定状态跳跃式地变到另一个稳定状态（这种跳跃式的变化称为“跃迁”），此时，伴随着发生能量的变化。既然微观粒子的能量是不连续的，它的能量的变化便也是不连续的，只能采取跳跃变化的方式。

通常用不同的水平线（称为能级）来表示微观粒子的不同稳定状态（或能量状态）（图1）。水平线之间的距离，正比于相应的稳定状态的能量 $E_1, E_2, E_3, \dots$ 之差。最低的线表示基态能级，较高的线表示高能级。稳定状态之间，即能级之间的跃迁，用连接相应水平线的垂线来表示。

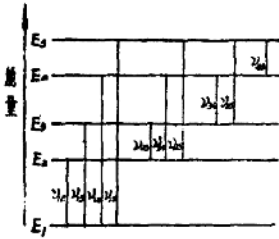


图1. 能级图

根据能量守恒定律，微观粒子从一个稳定状态跃迁到另一个稳定状态时，它要获得或者放出能量。微观粒子吸收外界能量（光能，热能，或动能等），将从较低的能级跃迁到较高的能级（也称激发态）；反之，当这些粒子从较高能级（激发态）跃迁到较低能级时，它将放出光能，热能或者动能等。这种跃迁可能是辐射跃迁（也称光学跃迁），

粒子获得或者放出光能（广泛地说，即电磁辐射能）；也可能是无辐射跃迁（也称非光学跃迁），粒子与周围跟它作用着的其他粒子直接交换能量。例如，电子碰撞引起原子和分子的激发，分子相互碰撞时内部动能从一个分子转移给另一个分子，就属于后一类跃迁。

一切事物的变化都有自己的规律性。对于辐射跃迁，则有如下的情况。当微观系统从能量为 E_i 的稳定状态跃迁到能量为 E_j 的稳定状态时，它所发射（或吸收）的电磁辐射的频率由下式决定：

$$E_i - E_j = h\nu$$

式中， h 为普朗克常数。这是关于辐射微观过程的能量守恒和转化定律。此时，系统以确定的一份 $h\nu$ ——辐射量子的形式发射（若 $E_i > E_j$ ）或吸收（若 $E_i < E_j$ ）电磁辐射。如果在广泛的意义上谈论光，把它理解为任何波长的电磁辐射，那末，辐射量子可以看作一类特殊的粒子，即光子。

三、普通光源的发光过程

处于高能级的粒子会自发地跃迁到低能级而发射光子。普通光源的发光过程，与这种自发辐射跃迁相联系。

在普通光源中，原子（或分子）按不同的方式不断地被激励到激发态，然后自发地返回到基态，失去能量而发射出光子。在一般情况下，通过激励作用（例如，白炽灯中，靠热激励，气体放电光源中，靠电子动能激励）而能聚集到高激发态上的粒子数总是有限的，因而，使得普通光源的发光能力（亮度）不强。

在普通光源中，各个原子（或分子）是相互独立地完成辐射跃迁动作的，自发辐射的光子在所有方向上杂乱分布，因此，光源发光的方向性很差。并且粒子从许多不同的高能级跃迁到低能级或基态，发射的光子频率各不相同，这就意味着光辐射中包含了各

种颜色的光，限制了光源的单色性。

发光物质的各个发光中心（被激发的原子，分子等）的辐射跃迁彼此独立，杂乱无章。在任一时刻究竟是那一个原子（或分子）发光，这是纯粹偶然的事件。这样，光以偶然的许多单独的小波群而发射出来，它们不规则地相互加强或者削弱；所形成的波阵面从一点到另一点变化着，并且不断地随时间而变化。因此，普通光源发出的光是非相干光。

四、光与物质的相互作用

激光与普通光源的发光机构有本质的不同。激光器的工作原理是基于感应辐射过程。为此，必须研究一下光与物质的相互作用。

为简单起见，假设原子具有两个能级 E_1 和 E_2 ($E_2 > E_1$)。设原子起先位于高能级 E_2 ，这样的原子可以自发地跃迁到低能级 E_1 ，并辐射出一个光子 $h\nu = E_2 - E_1$ 。如上所述，这是自发辐射过程，它是在没有外界光子（或称电磁辐射量子）作用的情况下发生的。

如果频率为 $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ 的一个光子射到受激原子上，则它会迫使原子跃迁到低能级。此时，原子辐射出一个频率为 ν 的量子，它与引起辐射的量子完全相同——具有相同的频率、偏振和传播方向，这个过程称为感应辐射。如果频率为 $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ 的光量子射到处于低能级的原子上，则这个光子可能被原子所吸收，而原子跃迁到高能级上，这个过程称为共振吸收。

图2表示光与物质相互作用的情况。图2(1)表示感应辐射过程。左边表示相互作用之前一个受激原子 ($E = E_2$) 和两个光子 ($\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$)。右边表示由于感应辐射

的结果，原子释放出具有相同频率的光子，跃迁到低能级，而三个相同的光子在平行的方向上继续自己的运动。注意原子感应辐射所释放的光量子不仅与入射光子同频率，而且保持位相方面的连续性；它们是相干的。

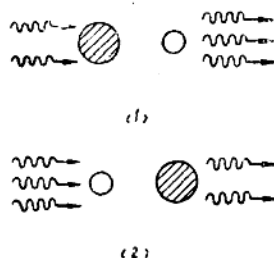


图2. 光与物质的相互作用

图2(2)表示共振吸收过程。左边表示相互作用之前一个基态原子和三个光子 ($\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$)。右边表示由于相互作用的结果，基态原子吸收了一个光子而进入激发态 ($E = E_2$)，而剩下的另外两个光子仍然继续自己的运动，既不改变自己的性质，也不改变自己的方向。也就是说，发生共振吸收时，光的强度减弱，但完全保持着相干的性质。

我们看到，感应辐射和共振吸收恰好互为逆过程，前者使入射光增强（光放大），后者使入射光减弱（光吸收）。这就是说，在光与物质的相互作用过程中，感应辐射和共振吸收构成了一对矛盾。“矛盾着的两方面中，必有一方面是主要的，他方面是次要的。其主要的方面，即所谓矛盾起主导作用的方面。事物的性质，主要地是由取得支配地位的矛盾的主要方面所规定的。”（毛泽东选集，第二九七页）关于这一点，量子力学的研究表明，感应辐射几率与共振吸收几率正好相等。因此，光辐射通过物质（原子或分子系统）之后究竟是增强还是减弱，是由处于高、低能级的原子（或分子）的数目决定的。如果有较多的原子（或分子）处于高能级，则感应辐射占优势，它成为主要的矛

盾方面，系统将放大入射的光；反之，系统有较多的原子（或分子）处于低能级，则共振吸收占优势，它成为主要的矛盾方面，系统将吸收光量子，光通过这种物质后，强度要减弱。

因此，要利用感应辐射过程实现光放大，必须获得一种工作物质，其中处于高能级的粒子数目大于处于低能级的粒子数目，从而使使得感应辐射占优势。

五、粒子数反转

很遗憾，一般情况下上述要求得不到满足。

在热平衡条件下，粒子数按能级的分布是由它们的热运动决定的。玻尔兹曼公式描述了这种分布：

$$N_i = N e^{-\frac{E_i}{kT}}$$

式中， N_i 是热平衡条件下处于能级 E_i 的粒子数目。 k ——玻耳兹曼常数， T ——绝对温度， N ——位于基态的粒子数。

上述公式指出，温度愈高（热运动愈强），处于高能级的粒子数就愈多。但是，处于高能级的粒子数总是小于处于低能级的粒子数。因此，在处于平衡态的量子系统中，总是共振吸收相对于感应辐射占优势，系统要吸收入射的光。

但是，“事物内部矛盾着的两方面，因为一定的条件而向着和自己相反的方面转化了去，向着它的对立面所处的地位转化了去。”（毛泽东选集，第三〇三页）感应辐射可以由劣势转化为优势，问题是要有一定的条件。我们就是要借助于某种人为的手段，破坏物质的平衡状态而建立非平衡状态，使得处于高能级的粒子数目大于处于低能级的粒子数目，从而使使得感应辐射过程占优势。人们把这种不同于一般情况的特殊状态，称为粒子数（或集居数）分布的反转状态。

如果认为系统的绝对温度 T 可以取负值，则利用玻尔兹曼公式可以形式地表征粒子数反转的状态。因此，由于实用的方便，也常常称粒子数反转状态为“负温度状态”，虽然温度的概念并不适用于非平衡态。

目前，已经提出并实际应用了各种有效的方法，在工作物质中获得粒子数分布的反转状态（见下节）。

“矛盾的主要和非主要的方面互相转化着，事物的性质也就随着起变化。”（毛泽东选集，第二九七页）在粒子数反转状态下，情况

发生了根本的变化。当频率为 $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$

的光子入射后，处于高能级 E_2 的粒子将跃迁到低能级 E_1 ，同时发射出光子，这个光子又引起其他激发态粒子的感应辐射，如此下去，同时发射出大量的光子，产生雪崩式的光放大作用。而且这种感应辐射过程所发射的所有光子，都与入射光子相同，见有相同的频率、位相、偏振和行进方向。人们把处于粒子数反转状态的工作物质的上述行为，称为光的受激发射。

六、实现粒子数反转的方法

为了获得光的受激发射，中心问题是要寻找便于实现粒子数反转的工作物质，以及在工作物质中实现粒子数反转的方法。已经发现很多物质（包括固体、气体和液体）都适合产生光的受激发射。这些物质的特点是：在组成物质的激活粒子（能产生激光的粒子）的某些特定能级之间，比较容易实现粒子数反转。至于具体实现粒子数反转，人们也找到了如光激励，电激励，热激励和化学激励等各种有效的途径。

理想的激励方法（即实现粒子数反转的方法），必须使激励到高能级的粒子绝对数目足够大，同时，当粒子从高能级落到低能

级时，它又能迅速地离开低能级。“抽空”低能级，同把粒子激励到高能级上一样重要。

最早出现的红宝石固体激光器采用光激励的方法。

激光红宝石是一种含有0.05%的杂质铬（激活剂）的氧化铝晶体（或叫刚玉）。而实际上只是利用了三价铬离子的不同能级之间的跃迁（图3）。在外界光的激发下（利

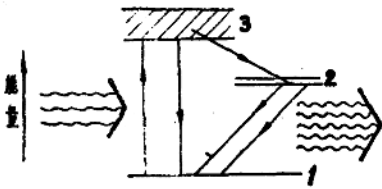


图3. 红宝石中铬离子的能级图

用脉冲氙灯），铬离子由基态1跃迁到由宽能带组成的激发态3。然后，铬离子或者从激发态返回基态1，并辐射出光（荧光），或者通过无辐射跃迁到达较低的激发态2。实验表明，铬离子从能带3到能级2的跃迁速度，比从能级2返回基态1的跃迁速度大 10^6 倍。因此，当铬离子被外界光源（氙灯）激发到能带3的速度，大于从能级2返回基态1的速度时，在激发态2上就有过剩的铬离子。若在一定的时间间隔（等于铬离子在能级2的寿命）使超过一半的铬离子处于能级2上，则在晶体中对于铬离子的能级2和基态1而言就产生了粒子数反转状态，因而可以产生相应的受激发射。

另一种主要的激励方式是电激励，例如，二氧化碳激光器采用的气体放电激励就是很好的例子。

在二氧化碳激光器中，二氧化碳是工作气体，通常还加入氮、氦和少量的水蒸汽作为辅助气体。图4表示 CO_2 和 N_2 的振动能级图。关于 CO_2 和 N_2 分子的结构，能级以及能级的表示法，在许多资料中都有详细的叙述。

实现粒子数反转的是 $\text{CO}_2(001)$ 和 (100)

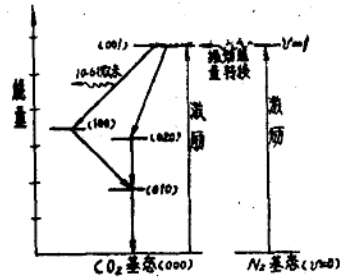


图4. CO_2 和 N_2 的振动能级图

振动能级。气体放电中的快速电子与 CO_2 分子碰撞，可以直接地把后者从基态激励到高能级(001)；由于加入 N_2 ，使 CO_2 分子更有效地选择激励到(001)能级上。关于后一点，可以作如下的解释。 N_2 分子本身很容易被激发，低压放电时，大约30%的 N_2 分子激发到 $v=1$ 的能级上。振动激发的氮分子不容易通过辐射跃迁返回到基态，要返回到基态，只有通过与其他分子碰撞，把能量转移给别的分子。由于 N_2 分子 $v=1$ 能级与 $\text{CO}_2(001)$ 能级很接近，当 $v=1$ 的 N_2 分子与基态的 CO_2 分子碰撞时，能量会有效地自 N_2 分子转移给 CO_2 分子（所谓能量的共振转移），此时， N_2 分子返回到基态，而 CO_2 分子从基态被激励到(001)能级上。气体放电中， CO_2 分子和 N_2 分子还能够被激励到更高的能级上，所有这些振动激发分子与基态 CO_2 分子的共振碰撞，都会增加(001)能级上的 CO_2 分子数目。

(001)态 CO_2 分子能够辐射10.6微米的光子而跃迁到(100)能级上，它还必须从(100)能级返回基态，以便可以重新利用来获得激光光子。分子离开低能级，本质上是靠与其他分子（例如 CO_2 分子和 H_2O 分子）的碰撞，在这里，能量的共振转移又起着重要的作用。关于这些，这里不作详细的叙述。

总之，在气体放电中，快速运动的电子使工作气体和辅助气体粒子大量地被激发，所有这些粒子相互碰撞（特别是共振碰撞），使大量的工作气体粒子聚集在一个特定的高

能级上，同时不断地抽空某一低能级，从而实现了粒子数反转。

人们也早就提出用热激励方法实现粒子数反转。现在，这种方法已经得到成功的应用。

热激励方法的基本原理是什么呢？

由上述玻耳兹曼公式可以看出，在热平衡条件下，对于任何一个能级，温度愈高，粒子数就愈多，温度愈低，粒子数就愈少；但高能级的粒子数目总是少于低能级的粒子数目。当温度急剧地变化时，每一能级上的粒子数要随之而发生变化，从初温下的值变为末温下的值。在这个变化过程中，物质是处于非平衡态。而且对于不同的能级，这个变化过程的快慢是不同的（所谓弛豫时间不同）。这就给我们提供了一种可能性。例如，当温度急剧地降低的时候，如果在某一时间范围内，高能级的粒子数还没有来得及变化（还相应于高温的值），而低能级的粒子数已经很快地从相应高温的值变到相应低温的值（“抽空”低能级），这样，高、低能级之间就可能出现粒子数反转。

作为一个明显的例子，基于热激励原理的二氧化碳气体动力激光器，已经获得几万瓦以上的连续功率输出。在这种激光器中，燃烧燃料产生高温高压的工作物质（ CO_2 和 N_2 气体），然后通过超声速喷嘴迅速地绝热膨胀，使温度急剧下降，从而实现粒子数反转。

利用快速进行的化学反应所释放的能量，可以激励工作物质的发光粒子，使其在一定的能级之间产生粒子数反转。关于这个问题，读者可以参考有关的资料。

伟大领袖毛主席教导我们：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。停止的论点，悲观的论点，无所作为和骄傲自满的论点，都是错误的。”

可以深信，不但可以改善现有的激光工作物质和激励方法，而且完全可能找到更合适的系统，更有效的激励方法，来获得光受激发射，满足各种实际的需要。

七、光学共振腔和受激发射的振荡

上面谈了粒子数反转和实现粒子数反转的方法。到此为止，问题并没有完结。要想利用有限大小（长度）的“负温度媒质”来得到激光辐射还是不可能的，因为光子会在很短的时间内跑出系统之外（光速为每秒30万公里）。只有工作物质无限长，才能做到这一点，而无限长的工作物质是没有的。因此，我们必须设计这样一种装置，使工作物质对入射光的受激发射放大作用，不是单程地发生，而是多次来回，反复地进行。这样，就可能利用有限大小的工作物质，形成一种持续的受激发射的振荡状态和单色辐射。这种装置就是光学共振腔。光学共振腔的作用，就在于使光子多次通过工作物质，产生持续的受激发射，并不断地把一部分受激发射光子输出腔外。

作为例子，我们来考察一下光经过工作物质，并依次从两个平行平面镜反射的情况（图5）。其中，一个镜面对激光是全反射的，另一个镜面对激光则是部分透射的。



图5. 平行平面共振腔

如果光线在镜面上的入射角近于直角，由于两镜面的多次反射作用，使得它不断地往返于二镜面之间，这相当于增加了工作物质的长度。在腔内的每一次往返过程中，光都得到放大，并且有一部分受激发射光子通

过部分透射镜面而输出腔外。如果在这个过程中,工作物质受激发射所产生的辐射功率,足以补偿通过镜面透射而输出的功率以及系统的其他损耗(如镜面的吸收,衍射损耗等),即受激发射所增加的光子数,足以补偿激光输出和系统损耗所减少的光子数,则可以建立稳定和持续的受激发射状态,这种状态就称为受激发射的振荡。

重要的是,光学共振腔起了限制光子振荡方向的作用,保证了激光输出具有很强的方向性。几乎垂直于镜面而传播的光线,实际上很难从系统中逸出,它往返于两镜面之间而不断地被放大。因此,任何一个“频率适当”的偶然入射的光子,或者由系统自发辐射的光子,在这个方向上能进一步引起大量同类光子的受激发射而产生振荡。那些不垂直于镜面方向行进的光子,在两镜面之间往返几次之后便会逸出腔外,因而不能形成有效的持续振荡。

所谓频率适当,就是指频率等于跃迁频率的光量子,它通过工作物质时,光由于受激发射而得到放大。但是,由于原子相互作用的结果,原子的能级具有一定的宽度。因此,受激发射的光放大作用,不仅可能在一个严格确定的频率上发生,而且可能在某个光谱间隔内发生。这个间隔的大小决定于原子自发跃迁辐射的谱线宽度。但是,与谱线中心频率相同的感应辐射的几率,永远是最大的。因此,当一群频率相差很小的光子通过工作物质时,频率与谱线中心频率相对应的光,比起与谱线“边侧”频率相对应的光来,得到最大的放大。因此,激光辐射的谱线宽度要小于入射光的谱线宽度。

此外,光学共振腔对振荡光子的频率有一定的限制。只能有效地激发这样的振荡:在共振腔中,它一方面得到最大的放大,另一方面能量损耗最小。由此可见,由于在镜面间多次反射并进行受激发射的结果,实际上被放大的只是一种类型的振荡,而所有辐射能量几乎都集中在这种振荡上。因而,输出的激光具有极高的单色性。

除上面介绍的平行平面型共振腔之外,还可以采用其他形式的共振腔,例如两块球面反射镜组成的共焦球面共振腔,它的两球面反射镜之间的距离正好等于球面的曲率半径。

八、结 语

由以上所述可以看出,为了获得光受激发射,激光器必须包括三部分:(1)工作物质,用来产生受激发射;(2)激励装置,用来激励工作物质以获得粒子数反转;(3)光学共振腔,用来维持受激发射的持续振荡,并限制振荡光子的性质(频率、方向等)。许多资料都描述了激光器装置的细节情况。

从能量转化的观点看来,激光器不过是一种将光能(非相干光能)、电能、热能、化学能或其他形式的能量,转化为集中在单一频率上的定向发射的相干辐射能的装置。能量转化,“这是一个伟大的基本过程,关于这一过程的认识综合着全部对于自然的认识。”(恩格斯:反杜林论,第十页)能量转化过程的研究,是自然科学的基本内容之一。

大功率二氧化碳激光器^{*}

编者按：本文曾在上期本刊上登载过。为适应读者需要，特再次予以刊登。

不久以前，人们还认为，固体激光器功率最大，一个简单的原因，是固体中激活粒子的浓度比气体高。但是，一开始就很清楚，固体激光器有许多缺点。从两个基本标准——光谱纯度和空间相干性的观点看来，它都不如气体激光器。不但如此，多数固体激光器只能以脉冲状态运转，换句话说，它的输出功率集中在短促、强烈的闪光之中，而不是连续的光束。与此相反，早期第一批气体激光器就给出了具有极好的光谱纯度和空间相干性的连续光束，但是，输出功率比固体激光器低得多。

自从出现了分子-气体激光器，情况就发生了根本的变化。这类新型激光器的明显例子，就是二氧化碳激光器，它能产生几千瓦输出功率的连续辐射，并且保持了小功率的原子气体激光器所特有的高光谱纯度和空间相干性。不久以前，用这种连续运转的CO₂激光器，得到了8.8千瓦的红外辐射；这是这种激光器今天获得的最大输出。这样的输出功率究竟多大，由下面的事实可以清楚地看出来：聚焦过的几千瓦的红外光束在几秒之内，能将 $\frac{1}{4}$ 英寸厚的钢板烧穿(图1)。

由于CO₂激光器在红外光谱区有很大的

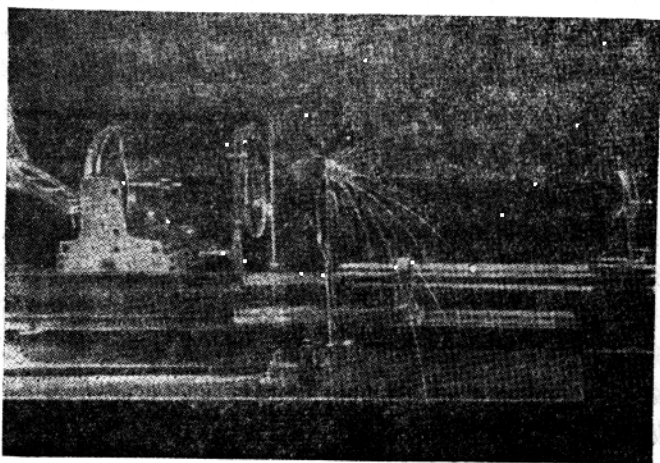


图1 二氧化碳激光器的超大功率的红外光束，在 $\frac{1}{4}$ 英寸厚的不锈钢板上烧穿一个洞，大约需要10秒。红外光束通过激光管末端的布儒斯特窗(左边)，然后通过半透甲板，入射到凹面反射镜(右边)上，聚焦在钢板上(中间)

输出功率，这就为关于同气体、液体和固体的非破坏性光学相互作用的研究，开辟了完

全新的波长范围。这种光学相互作用，也包括非线性过程。靠非线性过程，可以得到在

^{*} C. K. N. Patel, High Power Carbon Dioxide Lasers, Sci. American 219(2), 24(1968).
俄译文: Мощные Лазеры на двуокиси углерода. УФН т.97, в.4, р.697—713(апрель 1969г.)

某一频率范围内连续调整的相干红外辐射源。大功率 CO_2 激光器的其他应用也是可能的。光通讯和光学定位方面的应用可能是最有前途的。特别是 CO_2 激光器适于用作地面或者宇宙空间的通讯系统,因为大气对这种激光器发出的红外光束只有轻微的吸收。在本文中,打算说明这种新型的大功率气体激光器作用的物理基础。

一般而言,气体激光器由充以低压气体的容器(称为激光管)构成,激光管放在两个反射镜之间,后者形成光学共振腔。激光管中的气体(称为激光介质)由原子、金属蒸汽或分子组成。气体中的振荡作用,通常是由电子放电产生的;放电中存在的快速电子与气体激活粒子碰撞,把后者激励到高能级。激活粒子从高能级自发地跃迁到低能级,并以光子的形式辐射出能量。为了获得表现为激光作用的光放大,高能级上的粒子密度必须大于低能级粒子密度。这个条件称为集居数反转,因为它与粒子按能级的正常(或平衡)分布是恰好相反的。

为了在两个一定能级之间跃迁时获得大辐射功率,必须使激励到高能级上的原子的绝对数目足够大,同时,当粒子从高能级落到低能级上,它又能迅速地离开低能级。换句话说,《抽空》低能级,同把粒子激励到高能级上一样重要,因为对辐射已经做出贡献的粒子,应当迅速地回到基态,以便接着又被激励到高能级上,等等。粒子从低激光能级跃迁到基态所放出的能量,不包括在激光辐射的输出功率之中,也就是说,参与激光跃迁的每一个粒子,不得不损失一定的能量。这个事实给我们提示了估计具体激光系统的效率的明显方法。粒子从低激光能级返回基态时所损失的能量,等于把粒子激励到高激光能级所必须的能量与激光跃迁时辐射的光子能量之差。由此可知,这两个量子之比(即辐射能量除以激励能量),是给定的激光系统效率的量度。自然,每一个激发态粒子都发出激光辐射光子的情况,是一种理想

情况,因为此时认为,使高激光能级的粒子消激发的其他机构,例如向其他低能级的跃迁,都是不重要的。因此,辐射光子能量和激发光子能量之比,实际上是激光系统(输出)效率的最大绝对值,也称它为量子效率。

实际运转的气体激光器的效率,远低于量子效率,因为不存在一种完善的办法把气体粒子从基态选择激励到高激光能级。以气体放电中原子和快速电子相互碰撞而进行激励的情况作为例子。要激励原子,电子必须具有一定的能量。很可惜,气体放电中电子并不具有相同的动能,它的能量值分布在一个很宽的范围内。因此,一部分电子不仅不能把原子激励到高激光能级,而且不能把原子激励到较高或较低的其他能级上。这样,它们对激光输出功率就毫无贡献。结果只利用一部分电子放电功率来把原子激励到高激光能级上。如果我们把激光器运转效率定义为激光束输出功率对放电输入功率之比,那末很清楚,运转效率总是远低于量子效率。就激发机构的选择性而言,激光器愈接近理想系统,则运转效率与量子效率之差就愈小。换句话说,要在实际系统中得到高运转效率,高量子效率还应当与选择激励机构相配合。贝尔电话实验室于1961年研制出的第一个气体激光器,它在氖原子两个激发态之间跃迁运转,产生波长为1.15微米的强激光辐射。从那以后,几乎在所有的元素中都得到了激光效应,其波长从光谱紫外部分的2000Å(0.2微米)延伸到红外部分的133微米。

分子气体的能量谱,比原子气体复杂得多。除通常的电子能级之外,分子还具有由它的振动运动和转动运动所决定的能级。譬如说,对于给定的双原子分子的电子能级,还有一些几乎相互等距的振动能级,而对于每一个振动能级,又有许多转动能级。分子的电子能级之间的距离,与原子的电子能级之间的距离同数量级,而振动能级之间以及转动能级之间的间隔,通常约分别为电子能

级间距的 $1/20$ 和 $1/500$ 。结果,分子气体的能级图就变得很复杂(图2)。

在早期的分子气体激光器中,应用了一系列双原子分子的电子跃迁。但是,显然,

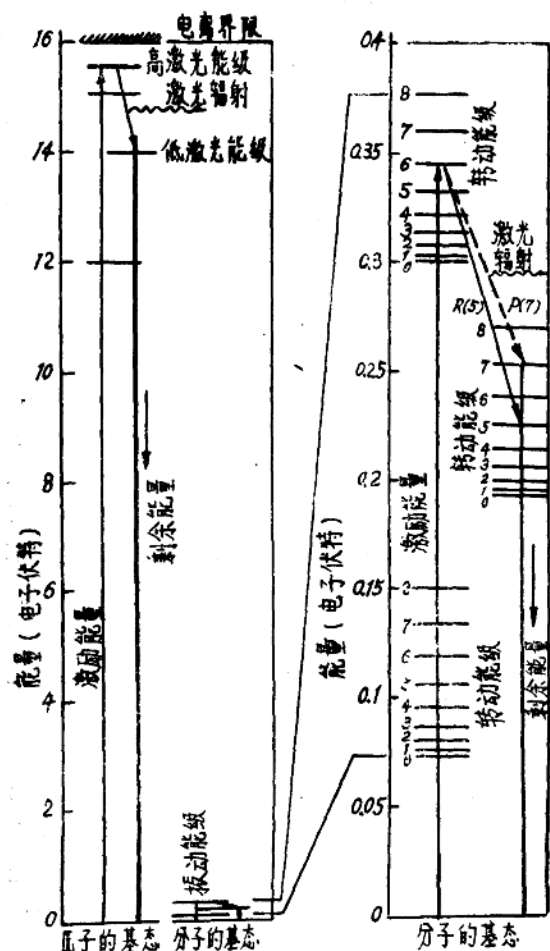


图2 原子和分子的能级比较图。原子的电子能级之间实现红外区域的跃迁,这些能级必分布在原子的电离界限附近,远高于原子的基态。因此,为了获得激光效应,与辐射光子很小的能量相比,原子则要激励到很高的能态。结果,应用原子气体,能量损耗很大;而量子效率很低。另一方面,在分子中,基电子态的振动能级很接近分子的基态能级。因此,辐射光子的能量,占总激励能量(即把分子从基态激励到高激光能级所需要的能量)的大部分。这就决定了高量子效率。图中右边表示,振动态同时包含了转动能级系统。每一能级的数字,给出动量矩的值(以 $h/2\pi$ 为单位)。指出了属于两个不同振动态的转动能级之间允许的红外跃迁。

分子的同一电子态的两个不同振动能级之间的跃迁,也是可以利用的。在两个不同振动态的两个转动子能级之间实际观察到了这种跃迁。此外,由于给定振动态的转动能级的离散和量子选择定则在最简单情况下只允许转动动量矩改变 $\pm h/2\pi$,因此两个振动态之间的跃迁,使光谱中出现整个振-转谱带(图3)。

谱带中心相应于不存在转动的情况下振动能级之间的距离。长波谱线相应于动量矩改变 $+h/2\pi$ 的跃迁,形成所谓P支,而一组短波谱线与动量矩改变 $-h/2\pi$ 有关,称为R支。由图可以看出,P支和R支几乎有相同的强度。这些通常相应于红外辐射的振-转跃迁,是超大功率分子气体激光器中所有过程的基础。

现在,我想说明一下,几年以前我在贝尔实验室是如何成功地制成了连续运转的振-转分子气体激光器的。在研究原子气体激光辐射的过程中,我们得知:为得到红外区域(波长大于几微米)的大功率输出,原子气体远不是理想系统。首先是因为,对于多数原子气体,跃迁处于红外区域的电子能级都分布在远离基态的原子电离界限附近。结果,为了获得振荡效应,必须把原子激励到很高的能级,而辐射光子的能量却比较小,这就是说,应用原子气体,则量子效率很低,运转效率也相应地低。

这种系统还有另一个严重的缺点。在元素的电离界限附近,相应于不同电子位形的电子能级,分布在一个很窄的能量范围之内。电子碰撞激励是在气体放电中获得激光振荡的机制,而这种激励本质上是非选择性的,因此,高激光能级上原子密度很小。这就又限制了输出功率,降低了运转效率,因为原子被激励到不同的能级上,损失了足以把原子激励到高激光能级的大部分快速电子。通常,辐射波长大约为10微米的原子气体激光器,只有几毫瓦的功率和大约0.001%的运转效率。

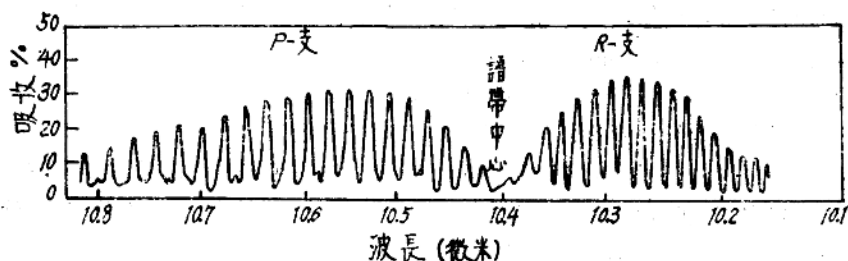


图3 转动子能级（属于 CO_2 分子同一电子态的两个不同的振动能级）之间的跃迁，产生一系列不同波长的红外辐射，这种波长形成所谓振-转谱带。曲线表示非激发态 CO_2 气体的吸收谱线的波长。谱带中心相应于不存在转动能条件下振动能级之间的间隔。长波方面的跃迁，相应于动量矩改变 $+\hbar/2\pi$ ，形成P支，而短波方面的跃迁是由于动量矩改变 $-\hbar/2\pi$ 而发生的，形成R支。图中所引出的谱带给出 10.6 微米激光辐射

而对于分子，情况有本质的不同。属于分子基电子态的振-转能级，作为高效率、大功率的红外激光系统是理想的。

基电子态的振动能级，非常靠近分子的基态能级，因此，激光光子能量占总激励能（即把分子从基态激励到高激光能级所必需的能量）的大部分。这就保证了获得比红外原子气体激光器高得多的量子效率。此外，由于振动能级靠近分子基态，在放电中几乎所有的电子都有效地参加激励过程。因为这样能获得高激光能级的大集居数，就保证了高运转效率和大输出功率。

根据这些考虑，我决定研究利用 CO_2 分子基电子态的振-转跃迁获得振荡的可能性。双原子分子由于它的基电子态的不同振动能级的寿命不合适，不宜用来获得振荡。

选择 CO_2 分子有两个原因：它是最简单的三原子分子，另外，已经有关于 CO_2 振-转跃迁光谱的大量资料。 CO_2 分子具有对称线性排列，有三个自由度（图4）。一个自由度是分子中的原子沿轴作对称振动。这种振动方式称为对称拉伸，用 ν_1 表示。另一种对称方式是原子垂直于轴振动，称为形变振动，用 ν_2 表示。最后，还有沿轴的反对称振动，用 ν_3 表示。按照量子力学定则，振动能量量子化，并且互不相等。

在一级近似中，这三种振动方式相互无关。结果， CO_2 分子可以被激发到由三种独立振动方式组合的某一个态，也就是说，分

子的振动态应由三个量子数 ν_1 ， ν_2 和 ν_3 来描述，其中每一个分别表示受激的振动量子数 ν_1 ， ν_2 ， ν_3 的数目。相应地，给定的振动能级的表示式具有 $(\nu_1\nu_2\nu_3)$ 的形式。

为简单起见，在 CO_2 几个低振动态的能级图中（图2），没有画出每一个振动能级

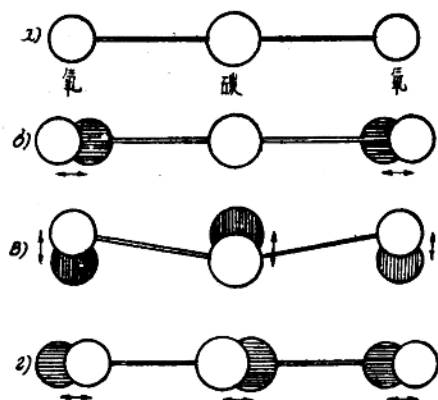


图4 a) CO_2 分子是具有对称结构的线性分子，它有三个振动自由度。b) 在对称价振动的情况下，原子沿分子轴作对称移动。c) 在形变振动的情况下，原子垂直于分子轴移动。d) 在反对称价振动的情况下，原子在沿轴的方向不对称地移动。分子的振动态分别用三个量子数 $\nu_1\nu_2\nu_3$ 描述，通常写成 $\nu_1\nu_2\nu_3$ 的形式，式中 $\nu_1\nu_2\nu_3$ 表示振动方式 $\nu_1\nu_2\nu_3$ 的振动量子数

的转动结构。转动能级比振动能级分布密得多。具有不同振动量子 ν_1 ， ν_2 和 ν_3 的振动能级，形成几乎等距分开的梯阶，而图中只画出了最低的振动态（一个或者几个振动能量

子)。由于好些原因,例如,分子在不同态下的寿命,基态电子碰撞激励的几率,等等,

(001) 能级宜于作高激光能级,而(100)和(020)形成低激光能级。到达低能级的分子,由于辐射,或者由于碰撞,通过(010)能级而跃迁到基态。(001)-(100)振转跃迁产生波长约10.6微米的红外辐射,而(001)-(020)跃迁,辐射波长约9.6微米。激光量子效率大约分别为40%,和45%。高量子效率,选择激励到接近基态的能级上的可能性,——所有这些,都使得这种激光系统的研究十分诱人。我们期望它能获得大约20~30%的实际效率。

在我们早期的实验中,激光管充以约1托(1毫米汞柱)的纯 CO_2 ,用直流高压电源获得气体放电。在这样的放电中,快速电子和 CO_2 分子之间发生大量碰撞。部分电子使分子离解成碳原子和氧原子。但是,这个过程的能量阈值很大,而具有那么大能量的电子很少。放电中速度不太快的电子,把 CO_2 分子激励到不同的振动能级上。同时发现,电子把大部分分子主要激励到 $(00\nu_s)$

能级上,它们形成几乎等距的振动量子 (ν_s) 系列。

必须记住,对于10.6微米辐射振荡,高激光能级是这个系列 $(\nu_s=1)$ 中的一个能级。这是否意味着,被激励到较高振动能级 $(00\nu_s)$ ($\nu_s>1$) 的 CO_2 分子就不参加激光辐射,因而降低了系统的效率和输出功率呢?实际上,情况并不是那样。因为 $(00\nu_s)$ 能级几乎被等间隔分开,因而 $(00\nu_s)$ 态和 (000) 态分子之间的碰撞使振动能从激发态分子有效地传递给非激发态分子。 $(00\nu_s)$ 态 CO_2 分子失去一个振动能量量子,变成 $(00\nu_s-1)$ 态 CO_2 分子。而 (000) 态 CO_2 分子得到这个能量量子,变成 (001) 态 CO_2 分子,换句话说,即跃迁到高激光能级上(图5, 6)。

这个过程具有共振的性质,只在分子之间发生能量的重新分配,而没有由于振动能转化为动能(热能)的任何损失。这就意味着, $(00\nu_s)$ 态 CO_2 分子转变为 (001) 态 CO_2 分子的效率很高,而没有能量的损失。

因此,在气体放电中依靠电子碰撞,实

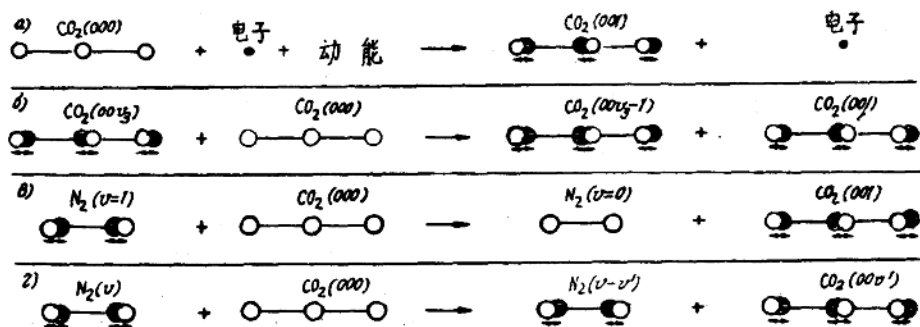


图5 CO_2 分子激励到高激光能级(在给定 (001) 能级下)的机构。(a)放电中 (000) 非激发态 CO_2 分子与电子碰撞,能够直接把 CO_2 分子激励到 (001) 能级上。这种碰撞可以把 (000) 态分子激励到 $(00\nu_s)$ 能级上,后者相当于振动能量量子数大于1。(b)接着, $(00\nu_s)$ 态分子与非激发态分子碰撞,一个振动能量量子转移到非激发态分子上,使它被激励到 (001) 能级上。(c)、(d) N_2 - CO_2 激光器中,振动激发态的 N_2 分子与非上。 N_2 激发态分子相互碰撞,一个振动能量量子从 N_2 分子传递给 CO_2 分子,使后者跃迁到 (001) 能级分子开始只有一个(3)或几个(4)振动能量量子

际上能够很有效地把 CO_2 分子激励到所需要的能级上。

(001) 态 CO_2 分子能够辐射10.6微米的光子而跃迁到 (100) 能级上,它还必须

从 (100) 能级返回基态,以便可以重新利用来获得激光光子。分子离开低激光能级,本质上是靠与其他分子的碰撞。在这里,振动能量的共振转移又起着重要的作用。把分

子激励到 (010) 振动能级所需要的能量, 差不多相当于低激光能级能量的一半。结果, (100) 态或者 (020) 态 CO_2 分子与 (000) 态

态 CO_2 分子相互碰撞, 就使得振动能量在两个分子之间重新分配, 每一个都激励到 (010) 态能级上 (图6, a)。

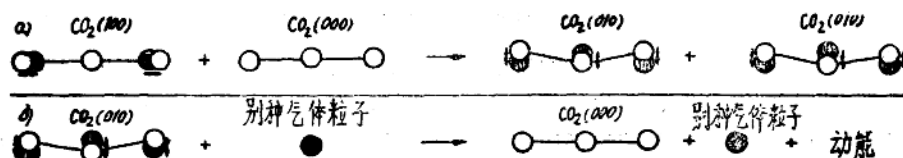


图6 能够《抽空》 CO_2 分子低振动能级的消激发机构, 可提高激光功率。这里示出两种消激发碰撞的方式。a) (100) 激发态分子与 (000) 非激发态分子碰撞, 使两者都变成 (010) 态分子。b) (010) 态分子本身也可能与别种气体粒子 (或者与管壁) 碰撞, 结果返回到基态, 从那里, 它又重新被激发

由于这个过程的共振性质, 低激光能级很快地被《抽空》。但是, 此时消激发过程并没有结束。

(010) 态 CO_2 分子还应当返回基态, 以便再次参加激光辐射作用。抽空 (010) 能级, 也是靠碰撞实现的, 但这不是共振过程。(010) 态 CO_2 分子的能量转变为动能。这是由于与其它 CO_2 分子, 别种气体粒子碰撞, 或与激光管管壁碰撞而发生的。

由于振动能转化为动能这一过程的非共振性质, (010) 态 CO_2 分子的消激发过程进行得很慢, 成为整个过程中最薄弱的一环, 降低了系统的效率和输出功率。一开始我就阐明了, 甚至在纯 CO_2 激光器中, 为了实现 (001)-(100) 和 (001)-(020) 振-转跃迁的强振荡 (辐射波长分别为 10.6 微米和 9.6 微米), 消激发过程都进行得相当快。曾发现, 由于跃迁几率大, 10.6 微米辐射强度约为 9.6 微米辐射强度的 10 倍。为简单起见, 下面我们只讨论 10.6 微米跃迁。

为了使实际效率接近于量子效率, 必须把分子选择激励到高激光能级, 但是, 非常清楚, 在纯 CO_2 放电中所实现的电子碰撞激励不能够保证这一点。原因在于, 电子能够把 CO_2 分子激励到不同于 $(00\nu_0)$ 的其他能级上, 这就既降低了效率, 也降低了输出功率。为了提高效率, 有几种选择激励 CO_2 分子到高激光能级的方式。如果在 CO_2 中加入

N_2 , 就能实现这样的选择激励。

注意 N_2 分子基电子态的低振动子能级的能级图 (图7), 则 N_2 的作用可以得到解释。氮是双原子分子, 只具有一个振动自由度, 它的振动能由能量量子决定, 而能量量子又只决定于沿分子轴方向的振动。相应地, 氮的振动能级用一个振动量子数 ν 描述。由于

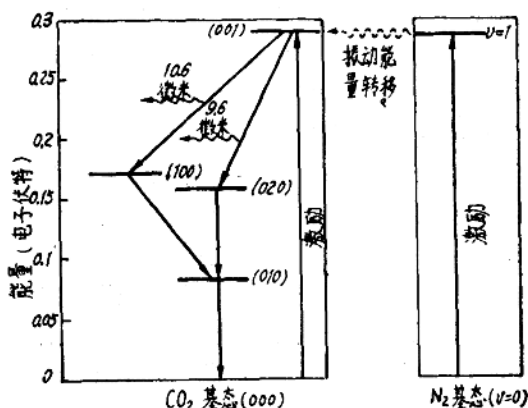


图7 在激光 CO_2 器中加入氮, 把 CO_2 分子选择激励到高激光能级上。双原子氮分子只具有一个振动自由度, 因此, 一个量子数 ν 就可以完全描述它的振动能级。在低压放电中, 氮分子受电子碰撞, 有效地从 $\nu=0$ 能级激励到 $\nu=1$ 能级, 因为 $\nu=1$ 的氮分子的激励能几乎等于 (001) CO_2 分子的激励能, 在 $\nu=1$ 的氮分子和 (000) CO_2 分子相互碰撞时, 能量便有效地由氮分子转移给 CO_2 分子, 结果, 氮分子损失一个振动能量子, 从 $\nu=1$ 能级反返回到基态, 而同时, CO_2 分子从基态被激励到 (001) 能级。然后, CO_2 分子跃迁到 (100) 能级, 或者 (020) 能级相应地辐射出 10.6 微米或者 9.6 微米的红外光

氮分子是由两个相同的原子组成，被激发到基电子态不同振动能级上的氮分子，不能靠辐射或者碰撞而放出能量，因此，这些态的寿命是很长的。

电子碰撞把氮分子从 $v=0$ 能级有效地激励到各种不同的振动能级上。由电子激发态的级联跃迁，或者氮原子的复合，也能使氮分子到达各种振动能级上。在氮蒸汽低压放电时，大约30%的氮分子被激励到 $v=1$ 能级。因为 N_2 分子的激励能几乎等于(001) CO_2 分子的激励能，可以预料，当这些分子碰撞时，振动能量会有效地自氮分子转移到 CO_2 分子上。由于这种碰撞，氮分子损失一个振动能量子，从 $v=1$ 能级返回到基态，而 CO_2 分子从基态被激励到(001)能级上。由于这一过程的共振性质， CO_2 分子很有效地被选择激励到高激光能级上(图5, B)。

此外，氮分子的高振动能级，也象 CO_2 能级($00v_s$)一样，几乎是等距离分布的。因此，当 $N_2(v)$ 分子与(000) CO_2 分子碰撞时，会实现振动能量的有效转移，结果， $N_2(v)$ 分子失去 v' 个振动能量子，落到 $N_2(v-v')$ 能级上，而(000)态 CO_2 分子得到 v' 个量子，被选择激励到($00v_s=v'$)能级上。因为 $N_2(v)$ 和 $CO_2(00v_s)$ 能级系列的间隔几乎相等，这种碰撞使得振动能量的共振转移具有很高的效率。然后，($00v_s=v'$)态 CO_2 分子依靠前面讨论过的共振碰撞，跃迁到(001)能级，即跃迁到高激光能级上(图5, 2)。归根到底， CO_2 分子有效地被选择激励到高激光能级上，而这就期望， CO_2-N_2 激光器的效率和输出功率，较之纯 CO_2 激光器有很大的提高。

验证这些假设的第一个实验装置，如图8所示。在气体连续流动系统中，放电并不在期待发生振荡效应的相互作用区域发生。进入装置中的氮通过激励区域，在那里加上交流电压或直流高压。氮分子通过放电区域，被激励到基态的不同振动子能级上。

由于气体连续流动，进入放电区域的氮

分子，在短于振动激发的氮分子的平均寿命的时间内，被抽到相互作用区域。因此，进入相互作用区域的氮气，大部分仍然处于激发态，即处于基电子态的振动子能级上。通过另一个孔进来的 CO_2 ，与氮混合。由于振动激发的氮分子与非激发态的 CO_2 分子相互碰撞，振动能量传递给后者。因此， CO_2 分子被选择激励到高激光能级。应当指出，在这个装置的相互作用区域，不存在 CO_2 分子的其他激发方式。尽管在这里不发生放电，分子的振-转跃迁仍然能够维持强振荡。

当 CO_2 分子对辐射作出贡献时，消激发的分子不断地被抽出去，而为了继续激光作用，要加入新的氮和 CO_2 。激光辐射强度大，这就证实了，可以有效地利用振动激发的氮分子，将 CO_2 分子选择激励到高激光能级上。氮蒸汽放电，随后在激光管中氮与 CO_2 混合，得到了高的能量转换效率($\sim 5\%$)。

在 CO_2 分子(010)能级上消除《薄弱环节》，从而加速抽空低激光能级，也能够提高 CO_2 激光器的输出功率和效率。我早就注意到，(010)态 CO_2 的消激发，是靠与其他粒子碰撞而使其能量转变为动能来实现的。这个过程进行的速度决定于其他粒子的性质。例如，在 CO_2 分子本身气压为1托的情况下，1秒大约经受100次这样的碰撞，而在同一气压下，氮原子在1秒则产生4000次消激发跃迁(水分子，则为100000次)，也就是说，我们还有一种方法，可以提高 N_2-CO_2 激光系统的输出功率和效率。

已经发现，为了获得高的连续输出功率和效率，在放电管中必须加入其他辅助气体。这种气体，如氧气，水蒸汽，氢气和氮气，可提高输出功率。这是由两方面的效应引起的：1) 抽空 CO_2 分子低振动能级的速度增加；2) 或者直接地借助于电子碰撞，或者间接地借助于氮分子激励速度的增加，使得 CO_2 分子激励到(001)能级的速度增加。要加速把 CO_2 分子激励到高激光能级