

传输激光能量的光子发生器和光子引擎

摘 要

由于气体激光技术的发展,目前已能产生高功率的连续和脉冲相干辐射。本文简要回顾了这种技术的发展过程。指出了通过这些发展,现在有可能考虑动力的辐射传输。回顾了气体动力型热激光器的基本热力学,证明了可按闭合循环的原理发展高效率的相干光光子发生器。探索了这种装置的效率极限,分析的结果指出:由热转化为相干辐射的生产效率,其极限有可能等于由热转化为电的生产效率。

在任何一种动力传输系统中,把传递的能量转换为有用轴功率的引擎也是必不可少的组成部分。本文指出有可能研制一个闭合循环系统,它能以接近于1的效率将激光的辐射能转变为轴功率。

一 引 言

激光器的发明或许是过去十年中最重要的技术发展之一。这种装置给了科学家和工程师们一种产生相干辐射的新工具^(1,2,3)。它引起了想象力和创造力的一场爆发,并创立了可能是一门新学科的基础。例如,在光学诊断,测量,讯号传播方面,激光已成为一种新的光源和主要工具。激光还实现了把全息摄影术应用于重现形体和信息的储存与分析⁽⁴⁾。讨论这些应用的意义是本文范围以外的事,但完全可以说,激光对这些领域的冲击已能看作是革命性的了。

由于Q-调红宝石或玻璃固体激光器的发展，很高脉冲功率的激光器（在几毫微秒内接近 10^9 瓦）已可能获得⁽⁵⁾。将这种激光器的输出能量聚焦，则在聚焦区内可达到十分高的能量密度。目前用锁模技术已达到的能量密度接近每平方厘米 10^{17} 瓦⁽⁶⁾。巴索夫（Basov）⁽⁷⁾和道森（Dawson）⁽⁸⁾已认识到由此可能得到高温高密度的等离子体，而这种等离子体应该对建造一种新的脉冲型受控热核机器是有用的。沿此途径已作出不同建议^(9,10)。最近已证实，利用激光照射能够产生热中子^(11,12)。

最近随着高功率 N_2-CO_2 激光器能力的发展，一系列新的应用现在成为可能了——从雾的清除⁽¹³⁾到用较长波长的辐射去加热短时控制在脉冲磁场内的等离子体⁽¹⁴⁾。加热等离子体的可能性显得特别有吸引力。和这种应用有关的某些特殊问题，将在这次会议上斯坦豪尔（Steinhauer）和阿尔斯特罗姆（Åhlström）⁽¹⁵⁾的文章中讨论。于是激光使我们有可能在实验室中将能量密度提到新的高度，并对热核动力机器的发展有很大的贡献。按这种方法产生等离子体的其他有意义的应用，将是发展高效弹道加速器和激光驱动激波管⁽¹⁶⁾。这仅是由激光提供动力的一种新技术的例子。

虽然上述几方面的发展是很吸引人的，但本文的主要目的在于讨论有效地产生高功率连续相干辐射的方法和有效地将激光辐射能量转变为机械功的方法。本文以下数节要讨论这些发展的历史，特别要讨论得到

无线传输动力不再是一种遥远可能这一论断的发展历史。重点将放在 N_2 - CO_2 器件上，它至今显示了最高的效率，但本文的评述不限于此激光系统。

动力的传输

工程界的梦想之一是动力的无线传输。自从赫兹的首创贡献以来，这个设想就成为一个不断反复出现的课题。显然，正是赫兹的想法导致了无线电报和随之而来的一系列发展。这种发展实际就是强讯号的无线传输，使信息能够传到很远的地方。频率很高的高效率振荡器的发展已导致能重的定向发射技术。因此在有限的意义上来讲，动力的无线传输已获成功。但是随着激光器的发展，已经能够产生极高的频率，并且仅用一个不大的光学系统就能把能量很少损失地或无损失地定向发射到几千公里处。因此，用辐射能量传输动力以开动远处的机器，这种设想已可能成为一项实际的工程。应用本身直接提出一大批应用课题，其中包括从地面上的动力站向空中的卫星供应动力，或者相反，由一个动力站（此站甚至可在空间）向远处的各种交通工具例如飞机供应动力而使它们行驶，这样作还可能有生态学上的好处。

作者充分注意到这些设想的明显的激进性和许多伴随而来的成本、穿过大气、瞄准限制及光束发散等问题。其实，要是在激光器出现以前，就连讨论这些问题都是滑稽的；没有激光器，任何有效地产生大量相干光能的实际技术都不能存在。最近这些已有了戏剧性的变化，我们能有信心地期待着相当重大的未来发展。

为了探索利用激光器传输动力的可能性, 本文将考察相干辐射能量的产生、传输以及再用作可用动力的某些效率极限。特别要考察近来已有文章介绍过的利用 N_2 和 CO_2 的气体动力型热激光器并确定它的效率极限。利用一个由快速膨胀过程引起激射作用的设想的相干光光子发生器, 来证明这种激光系统的效率原则上可以很高。实际上, 用于这种发生器的全部轴功率都能直接转化为相干辐射。虽则由各部件的效率所产生的实际限制是严重的, 但这种发生器允许对限制效率的各种因素进行分析, 并树立一个我们力图达到的目标。

任一动力传输系统的必要部分, 不仅包括发生器, 而且还包括引擎或能接受光能并将它转变为有用形式的装置。如果辐射能量仅作为热能来用, 那么辐射传输动力的主要障碍之一就是它的有限的热效率。因为材料的正常使用极限将把重复转换的效率限制在 30% 到 40% 之间。因此需要的是具有合理的能量密度、具有可能的高效率、由辐射能量直接推动的引擎。

为了获得这种种能力, 将介绍一个叫做光子引擎的装置。它有控制和转换相干辐射能量的功用。它也是一个叫做光子容器的装置的基础。如上所述, 所有这些装置都是基于流体力学热激光器的工作原理制造的, 这种激光器通常叫做气体动力激光器, 用氦和 CO_2 作工作流体。

下面几节将充分详细地介绍 $N_2 - CO_2$ 型热激光器, 从而发展能够以最有效的可能方法把热转化为相干辐射能量的发生器的设想。以此

为基础，介绍能够以近似于1的效率把激光辐射能量重新转变为有用机械功的光子引擎。这样就提供了任一动力传输系统应有的两个必要部分。

三 热激光器

1959年賈万 (Javan ⁽¹⁷⁾) 继肖洛 (Shallow) 和汤斯 (Townes ⁽¹⁸⁾) 的历史性文章之后，第一次提出了能在气体中获得电子聚集数反转的建议。这个工作导致研制成功第一个气体激光器，其中利用电激励的氮的亚稳态来把氮选择地泵浦到特定的能级，由此在气体中获得聚集数反转 ⁽¹⁹⁾。现在这种气体激光器已高度发展成为最方便的连续波激光辐射能源之一，并为后来所有气体激光器的发展奠定了基础。

1962年当考察在各种快速膨胀流中产生非平衡态过程时，赫茨伯格 (Hertzberg) 和他的同事指出，如果气体起初处于高温态，在该态下各必需的激励能级都达到了足够的平衡聚集数则有可能利用气体的快速绝热膨胀造成电子态的聚集数反转。快速膨胀能够创造这样的条件：只要上能级的去激速度比冷却速度慢，该能级的聚集数将基本上保持冻结。如果同时由于快速冷却的结果，下能级聚集数能够被碰撞或辐射输运抽空，则将能够得到聚集数的反转。上、下能级必需有不同的弛豫速率。这个工作后来曾加以扩展并于1964年送交发表，于1965年发表 ⁽²⁰⁾。这种流体力学激光器的基本几何形状在那篇文章中作了介绍，并已证明和现在研制的是一致的。大致与此同时，巴索夫等 ⁽²¹⁾ 独立地提

出了用快速加热或冷却造成聚集数的反转。但在发表这些文章的期间，气体激光器尚处于初期阶段，许多今天证明了是有价值的系统当时尚未造出来。但由于1964年佩特 (Patel)⁽²²⁾ 研制出了 $N_2 - CO_2$ 激光器，功率很高的新一代气体激光器成为可能。这种激光系统在红外区发射激光，其特点是利用 N_2 和 CO_2 混合气体的辉光放电，并借助于适当的触发剂以促进下激射能级的抽空，从而获得聚集数的反转。事实上，其基本过程与氩氟激光器中的过程有许多相似之处。象氩氟激光器那样，工作气体 (在本情况下是 N_2) 的亚稳态是在电子的碰撞激励下聚集起来； N_2 的第一激发态与 CO_2 产生 10.6 微米跃迁的上能级接近共振，把它的振动能

量转交给未激励的 CO_2 分子 (见图 1)，由此泵浦了 CO_2 的上能级，这大致和已受电激励的氩亚稳态泵浦氩的上能级一样。由于在电子碰撞下激励 N_2 亚稳态第一振动能级的碰撞截面很大，电能量就容易且有效地转交给 N_2 ，从而在 CO_2 中产生聚集数反转。

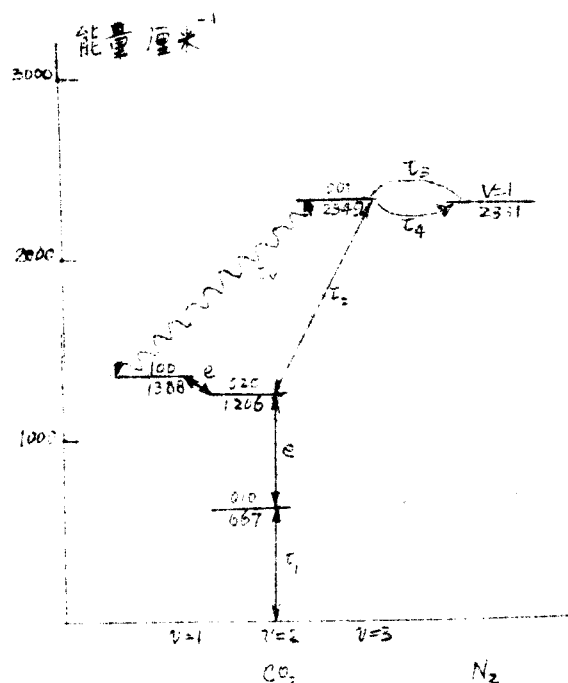


图 1 简化的 N_2 和 CO_2 能级图

~ 3 6 ~

已证明这种特殊激光系统最适于用在赫尔 (Hurle) 和赫茨伯格提出的快速膨胀方案。因为它的上、下激射能级有不同的弛豫速率，这恰是热泵浦所需要的。阿符科的爱美雷特研究实验室认识到和实验证实了这重要的可能性。并由格里 (Gerry)⁽²³⁾ 于1979年4月在美国物理协会会议上作了详细报告。阿符科集团最先认识高能密度系统的可能性，并随而发展了可从流动气体动力系统中得到大量辐射能量的基本技术。科组霍天 (Konyukhov) 和普罗霍罗夫 (Prokhorov)⁽²⁴⁾ 以及巴察夫等⁽²⁵⁾ 都独立地认识到利用热泵浦 $N_2 - CO_2$ 混合物以获得聚集数反转的可能性。

在气体动力激光系统中，聚集数反转是通过下列过程获得的。在常规的收缩—扩张喷管的前室将包含少量水蒸气或氮的 $N_2 - CO_2$ 混合物加热到接近 $2000^\circ K$ 的温度。加热可由几种方便途径来完成，诸如用激波管，或用电弧射流，或用燃烧产物含适量 N_2 和 CO_2 的火箭发动机。当 $N_2 - CO_2$ 气体混合物被如此加热时，在 N_2 和 CO_2 中都产生了激励态的平衡分布。氮的第一振动能级受到热泵浦，而在纯 N_2 的情况下，该能级振动能级大约相当于9%的内能（在 $2000^\circ K$ 时），或大约相当于7%的流动能（图2）。假若气体通过收扩喷管膨胀足够快，喷管中气流的冷却速度就能远快于 N_2 的弛豫速度，因此就基本上有可能在喷管的超音速膨胀段把 N_2 的第一激励能级的聚集数冻结，并维持接近于和气体平动温度热平衡的振动温度。于是在喷管的超音速段

就有产生聚集数反转所需要的基本条件，即在气流中存在两个极不相同的温度。从热的关系来看，下激光能级对应于由膨胀造成的低平动温度，它是室温量级，而所有下能级通常应有与此温度相对应的聚集数分布。联接链环

(Connecting link) 是接近于共振能量交换的，

即从振动激励的 N_2 到 CO_2 非对称拉伸振模。由于 CO_2 的上激光能级试图达到的粒子数密度所对应的温度比下激光能级的温度高得多，于是获得了聚集数的反转，如图 3

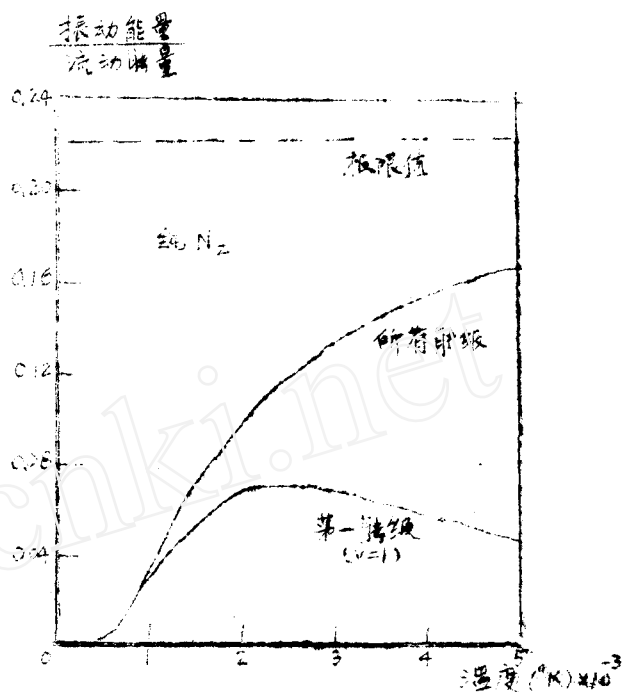


图 2 N_2 振动能量与流动能量之比与温度的关系

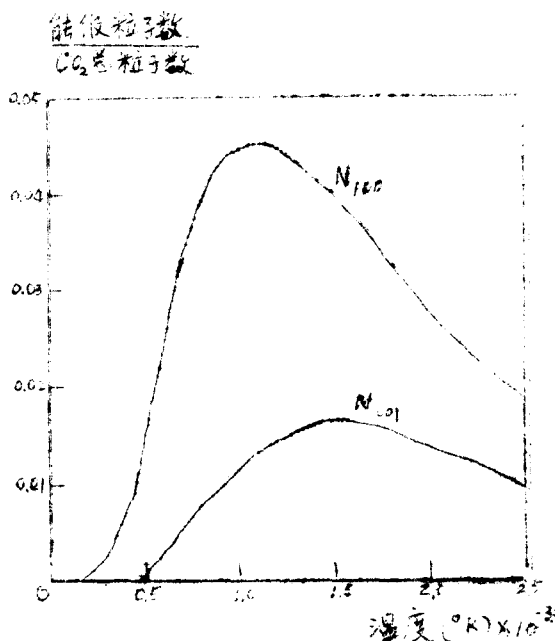


图 3 温度与 CO_2 能级粒子数的关系

~ 3 8 ~

所示¹⁾。应指出，为使混合气体的冷却速度快于上能级的弛豫速度，需要一个很短的喷管。赫尔和赫茨伯格⁽²⁰⁾指出，在实际意义上有可能获得的最快的膨胀之一，应是由自由喷射的普朗特-迈耶膨胀扇获得。他们也指出，从更实际意义上说，在一个能容纳更多质量流的系统中，利用路德维格 (Ludwig)⁽²⁶⁾ 首先提出以及库兹维格 (Kurzweg)⁽²⁷⁾ 独立提出的格栅喷管，可以获得大致相同的结果。

格里⁽²³⁾已详细描述过该系统中的气体运动论过程。除此以外，克里斯琴森 (Christiansen)⁽²⁸⁾ 和宗加斯 (Tsongas)⁽²⁹⁾ 也对这种系统中的运动论过程作过详细研究并得到实验证实。巴索夫等⁽²⁹⁾ 和安德森 (Anderson)⁽³⁰⁾ 还对流动——运动论过程的耦合问题作了数值解。事实上我们对此种系统的知识增长得很快，以至于有可能以惊人的准确性预言，在已给任一形状和尺寸的该类系统中用于发射激光的可用能量有多少。这个事实极其重要，因为它提供了一个出发点，由此可对这类系统热力学性能的极限可能性进行计算。

不幸的是，格里描述的热激励激光器的表观效率较低，其气体总焓中仅有 1—2% 能够用作激光辐射。这样的效率完全比不上通常电激励

1) 目前，动态化学激光器，流体混合激光器，以及动态电激励激光器（由于引进流动原理而得到改进的改型），都有了重大的发展。

$N_2 - CO_2$ 激光器的效率。据报道，后者的效率接近 30%⁽³²⁾。但应该指出，电能和轴能一样，必须以大约 30—40% 的效率才能得到，因此电系统在它最有效工作时总效率至多是 12% 左右。如果欲将激光系统作为发展动力传输系统的正常工具，这样的效率是不太令人鼓舞的。

华盛顿大学的盖茨伯格与阿尔斯特罗姆 (Ahlstrom) 和波音科学研究实验室的乔治·马拉尼 (George Mullaney) 共同考察了各种增加气体动力激光器效率的途径。特别他们认识到，激光器取出的能量仅影响气体的滞止温度，因此以扩压器为基础的能量恢复系统将能够再次热泵浦气体，使得下一次膨胀能够再次激励该系统。格里描述的系统包括一个扩压器，但这个扩压器仅仅是用来使光腔中的总压得到足够的恢复，以便将废气排入周围大气。华盛顿大学的集团因此建议，激光系统的一个合乎逻辑的引伸应是闭合循环，这种闭合循环气体动力激光器的特色将在下面叙述。

三 光子发生器

在光子发生器 (闭合循环气体动力激光器) 中，气体将经由超音速格栅喷管膨胀进入光腔而取出激光能量，用有效的扩压器使气体回升到接近滞止温度，然后通过热交换器和绝热压缩机重复循环到初始的激射状态。因此基本的闭合循环系统看起来和常规闭路式超音速风洞很相似，如图 4 所示。

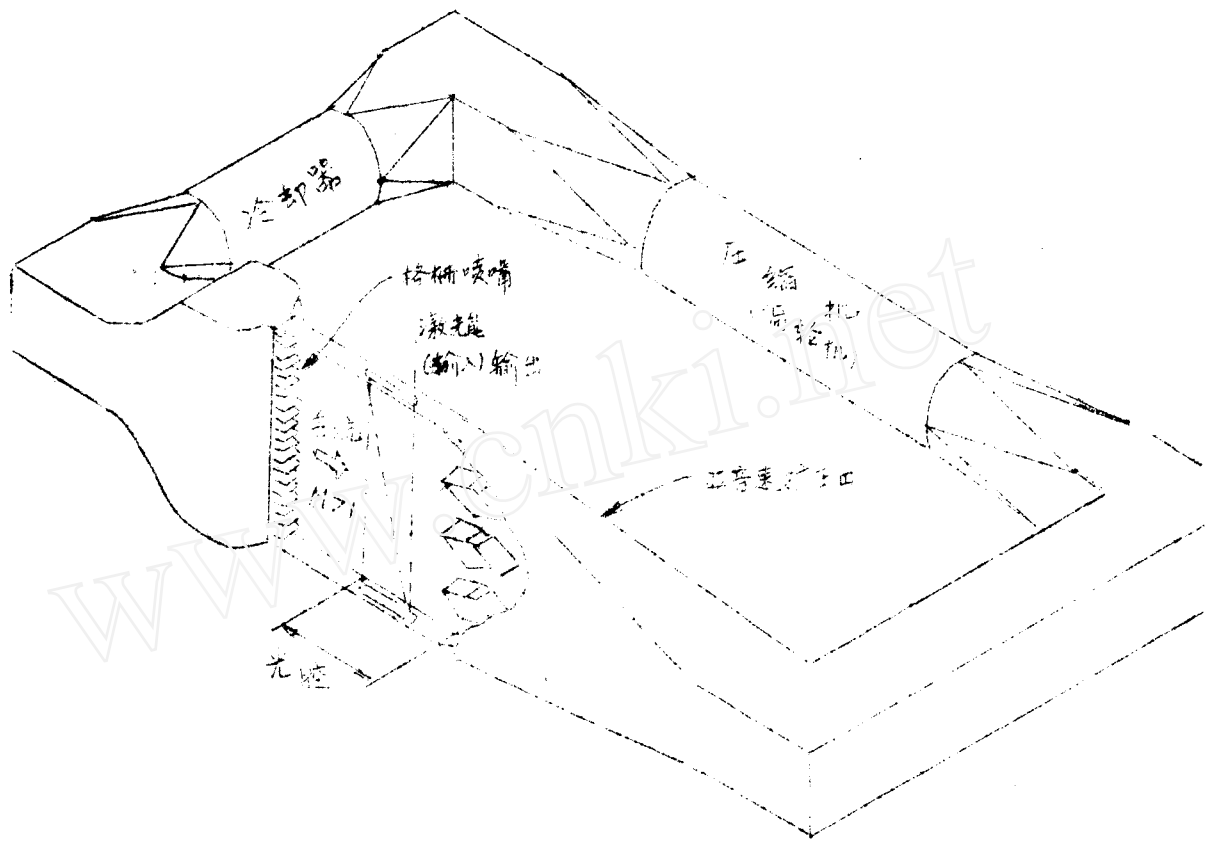


图4 光子发生器（光子引擎）草图

实际制造这种系统的主要障碍之一是，为了确保有效的激射作用，气体温度必须超过高温压缩机材料的通常温度极限。例如，长时间连续工作的不冷却的涡轮机，其温度极限已确定为 1000°K 左右。从图2中看到，在 1200°K 以下， N_2 的振动能量仅有一小部分是可用的，因此在这个激光系统中必须加进一高温压缩机。目前已经研制出了压力交换器（Comprex）型高温压缩机用于作材料试验的高超音速风洞中⁽³⁵⁾。

为了便于分析，对闭合循环作计算时关于部件性能和气体动力过程要作某些假设。在前室中全部气体处于热平衡，各不同能态的粒子数分布用一个温度表示。气体通过喷管时起初维持热平衡，以后当气流速度增加时振动温度趋于保持高温，而平动温度下降。于是假定 T_v ，振动温度采取相应于喷管尺寸和工作气体的某一特征值。为了便于计算，常採用突然冻结近似。在此近似中，振动系统和平动系统的热接触假定在膨胀喷管的某一点瞬时破坏。在实际情况下，此二系统间总会有一些能量交换，因此有一定的熵增，但这个损失与循环中其他损失相比是小的。用突然冻结近似，系统的总熵保持常值，这一假设便使计算简化。

除热交换器以外，与壁面的热交换可以忽略。这个假设对较大的机器是完全合理的，因为在此机器中，壁面与气体的温度处于热平衡，而与外界是适当绝缘的。这种系统中的流动损失，例如转向片的损失，喷管及管道中的粘性影响，可一起合并到与扩压器引起的总压力降中去。这一假设在计算闭路式风洞时是很常用的，因为一般情况下这个损失远超过其他损失，因此假设压缩机是绝热的，同时热交换器在不变的压力下工作。

除了扩压器的损失以外，还有在这种系统中出现但在超音速风洞中一般不出现的其他损失。如前面已指出，在试验段， N_2 的振动温度能够保持显著高于平动温度。在激射过程中， N_2 的振动能量仅有一部分可以用激光辐射，而由于维持下激光能级处于平动温度的过程，相当大

部分的 N_2 振动能量。即 N_2 的冻结能量的 60% 左右。将变成热而加进超音速气流。假定激光器和一高效光腔耦合。因此绝大部分辐射能都从光腔中取出而不为镜片所吸收。则与激射作用有关的总压损失可由一极简单的计算求得。由于热是加于较高 M 数的气流中。这个损失可能是很大的。

在循环的其余过程假定处于热平衡。气体则被反复循环。总压损失通过绝热压缩机补足。而热则在常压下由冷却器收回。图 5 表示一个理想扩压器、等熵压缩机、等压冷却器以及不变面积光腔的循环温度分布。

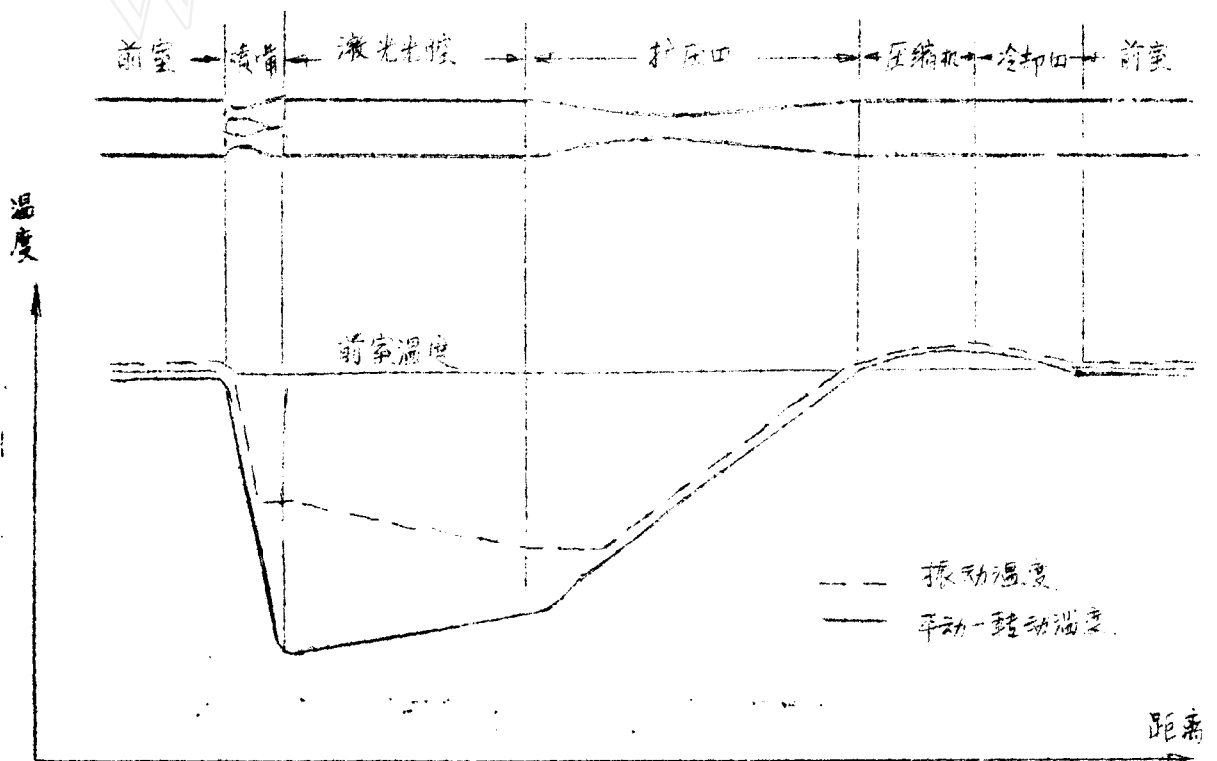


图 5 闭合循环激光器的温度分布。此激光器有不变面积光腔。理想扩压器。等熵压缩机。等压冷却器

对一个主要由 N_2 组成的激光介质工作的闭合循环作了初步数值解。

假设在一等面积的光腔中可以足够有效地从气流中取出所有可用的激光能。如前室温度为 1700°K ，冻结温度为 1417°K ，光腔进口处 $M = 4$ ，则图 6 表示热转变为激光能的效率是扩压器所引起的总压降的函数。假定热能够以 40% 的效率转变为功，也即冷却器按该效率把输入的热转变为功，然后再输入压缩机中，于是得到再生。

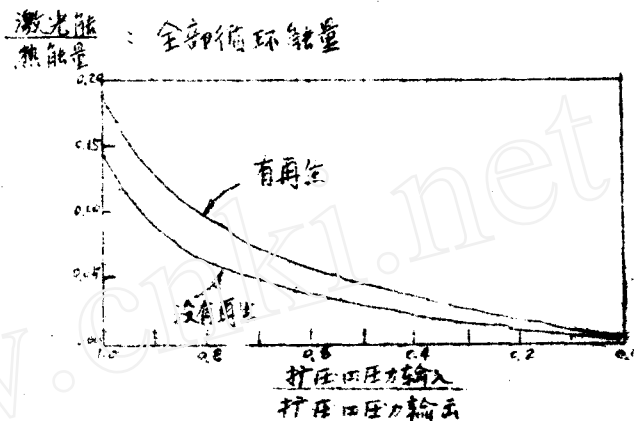


图 6 扩压器压力恢复对光子发生器总循环效率的影响

由图可见，甚至采用理想扩压器，转换效率都是低的，大约为 19%。其原因在于激射期间总压有很大的损失（大约 25%）。欲想在等截面光腔中靠改变工作温度以增加激光能量输出，这样的努力，结果将使生产效率更低。第五节的分析是对闭合循环激光器热力学的较深入研究的結果，是由欲求改进转换效率使超过上述初步计算的希望促使进行的。

第五节中表明，适当调节气体的振动温度和平动温度之比，激射作用所引起的损失就可降到最低，并能达到这样的情况：此系统不需要因为激射作用而将热排除掉，若采用理想扩压器，则压缩机提供的功就等于所取走的激光辐射能量。轴功全部转换为激光辐射是一个极限情况，但实际上是不易达到的。由于轴功必须从热能得来，显然有可能在一个

非常理想的系统中以与热能发电大致相同的效率产生相干辐射。

当然重要的技术问题是扩压器引起的低效率，特别是气动激光器通常会有的高 M 数引起的低效率。对于不等熵扩压器的情形，必须供给压缩机的轴功大于所取走的激光辐射能量，二者之差作为热而通过冷却器排除掉。

在建造这种机器的时候，还得克服许多实际的困难，但这些问题看来是在技术上可能实现的限度之内的。另外，极高效率的潜力使此类器件值得认真深入考虑。

四、光子引擎

如前所述，一个有效的动力传输系统必须同时包括发生器和引擎。实际的传输将由一个用以瞄准辐射的合适的光学系统和一个在需要应用的地点把能流注入引擎的相应的光学系统来完成。光子发生器和光子引擎类似于发电机和电动机。在这两种情况中，发生器和马达都可以互换。将证明在原理上，可以把闭合循环光子发生器改造，使之吸收相干辐射能，从而有效地产生轴功率。

改造可说明如下。在图4中表明一闭合循环光子发生器，考虑工作参数的如下变化。气流再次从前室通过喷管膨胀。但是用通常的超音速喷管而不用格栅喷管，因为代替光腔的吸收段需要热平衡。气流的滞止温度是如此选择，使得在吸收段超音速 M 数的情况下，混合物的平衡静止温度在 $800\text{—}1000^\circ\text{K}$ 之间。把激光的辐射耦合到这个吸收段，

如果强度足够大的话，就会

发生下列过程。当 N_2 —

CO_2 — H_2 的混合物进入

吸收区时，由于受热，下激

光能级的聚集数分布如图7

所示，而上激光能级则有小

得多的聚集密度。在图7中

作为一个特例，表示了随着

一个以流体速度运动的微团

在吸收段中在一固定输入强

度下的能态。因此，这些能

态的变化是作为时间的函数

而不是作为距离的函数表示的。能态的这种分布是与聚集数反转相反的。

激光辐射被强烈地吸收。这时不管是上激光能级还是下激光能级，

在辐射场中都企图达到新的平衡态。对一足够强的辐射，下激光能级

的聚集数 n_L 将减少而上激光能级的聚集数 n_U 将增加，直到它们相

等为止。当 $n_U = n_L$ 时，我们说气体被漂白 (bleach) 了。

但由于气体含有 N_2 ，故上激光能级的能量就有效地递交给 N_2 的第

一振动能级。因为这是一种共振的 $V-V$ 跃迁，所以进行很快。

最终的漂白条件是两个激光能级的聚集数相等，而 N_2 的振动温度等

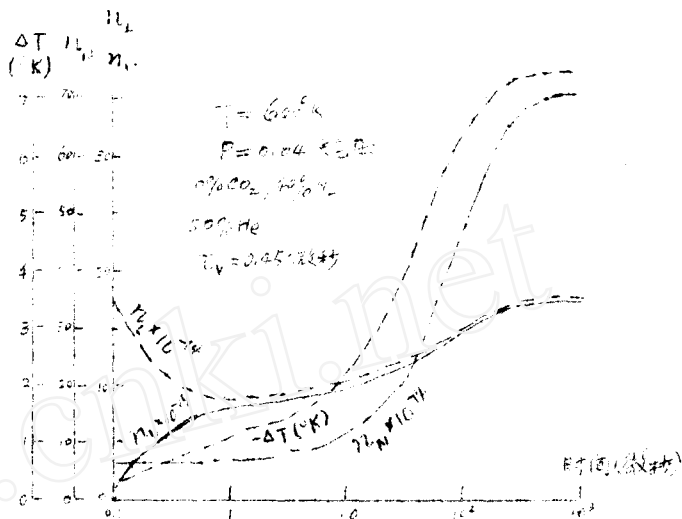


图7 N_2 — CO_2 — H_2 混合气在漂白期间重要能级的温度和聚集数的变化

于 CO_2 (001) 态能级的温度。现在因为能量是储存在 N_2 的 $v=1$ 态中，平动—转动能量就从气体中取走而产生了超音速气流的冷却。对每一个激励到 $v=1$ 态的 N_2 分子，仅有 40% 的能量是来自激光，其余的能量则来自聚集下激光能级和降低平动温度的 $T-V$ 跃迁。依赖于这些气体的混合比和温度，冷却可能是重要的（在平动温度的 1—5% 之间变化）。

与超音速气流的加热相反，超音速气流的冷却要引起总压的增加。在漂白过程以后，气体进入格栅扩压器，经过突然的解冻过程，气体再转入新的平衡。在扩压器之后，气体混合物将有稍高于上游相应压力的最终滞止压力，当气体重作循环时，热再一次从冷却器中取出，但由于现在总压增加了，压缩机这时就成了涡轮机，于是就能从该系统中取得轴功率。所以这个器件叫做光子引擎。

在进行计算时，确定了在平动—转动温度和振动温度之间需要一个特殊平衡。的确，用上面建议的温度平衡，光子引擎的效率将是零或负。辐射将被吸收，但熵的增加将如此剧烈，使得无法得到轴功，而事实上将需要一个压缩机来进行循环。但如果正确地选择温度，效率就将是正的而且很高。因此必须把设想加以修改，使得初始膨胀是不平衡的，并使平动—转动温度和振动温度之间有一个特殊的关系。还有，在吸收过程期间，为了使温度平衡保持最佳比值，通道的面积应是变化的。在关于热力学的第五节中将看到，这将有可能得到把吸收的辐射全部转换为

轴能量的高效率光子引擎。在实际的光子引擎中，其部件的效率不会允许达到前面指出的100%的可能效率。

也应指出，用超音速冷却法得到闭合循环系统，在此系统中按回路将气体泵浦，这种想法并不是新的。但夏皮罗 (A.H. Shapiro) 曾指出，放在超音速气流中的通常的热交换器，其传热机理包括摩擦损失，一般它将超过任何由于冷却而引起的总头的增加。在光子引擎的情形，冷却发生在没有摩擦的体积中，因而这个限制不一定适用。

光子容器：

本器件令人感兴趣的不同之点是，接收的辐射能量在很短时间内基本上储存在振动受激的 N_2 中。考虑一个吸收激光辐射，储存它，然后再次作为激光辐射发射出去的器件的可能性。它的一个重要的实际应用，可能是对多模 CO_2 激光辐射进行处理以增加模的纯度。为使 CO_2 激光系统的效率最高，也许必需牺牲获得高亮度光的可能性。但靠着利用光子容器，可能以合理的效率对激光再次进行处理以使亮度得到恢复。由于有关这个器件的运动论过程本身是有意义的，细节将在附录A中讨论。

[未完待续]